

البرق آتشفاني

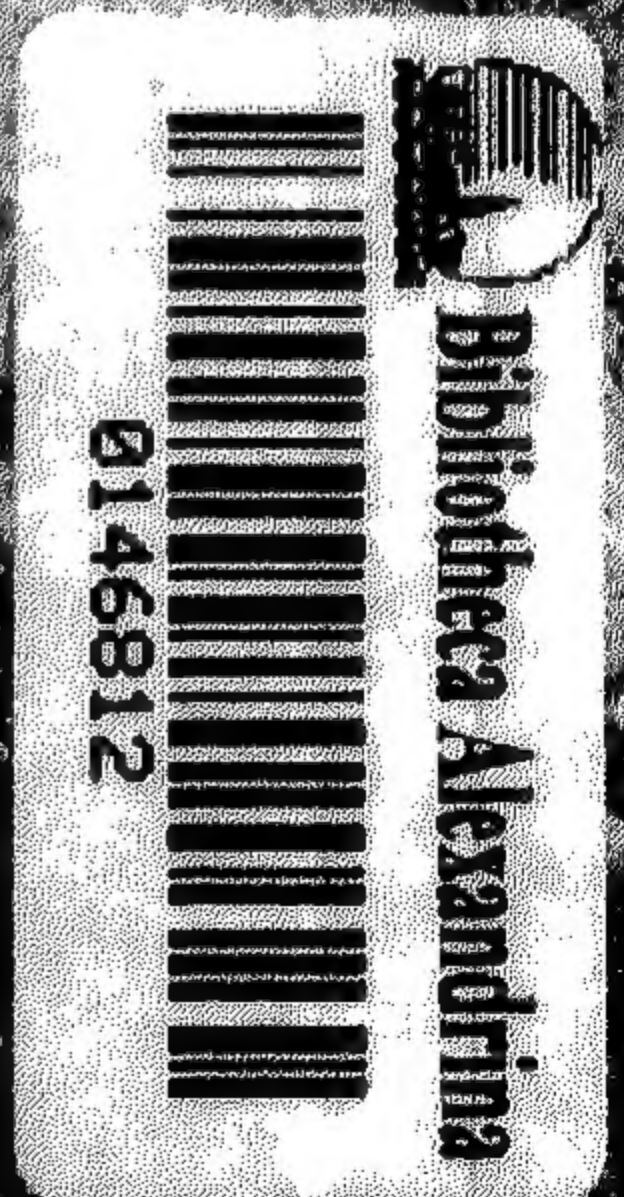


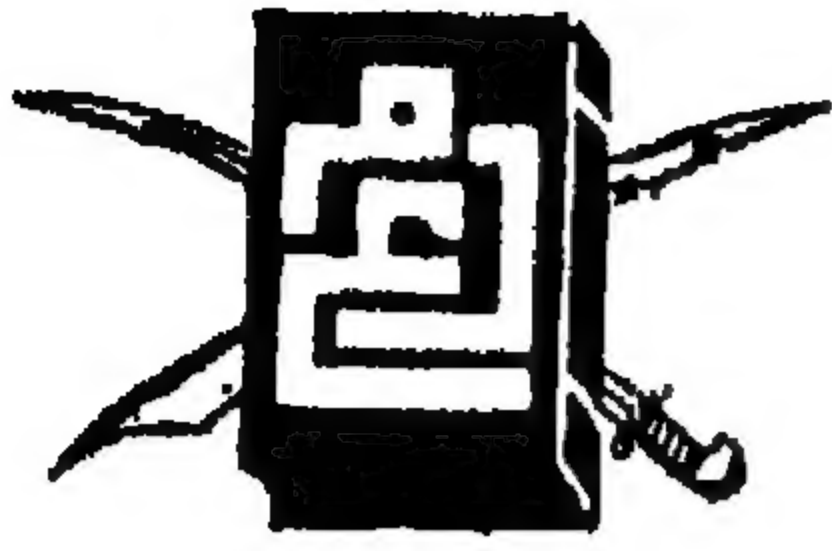
النسب

التاريخية الخاصة والنظرية العلمية

ترجمة:
د. أحمد السمّان

مركز الدراسات العسكرية
دسوق ١٩٨٥





الجمهورية العربية السورية

النسب

النظرية الخاصة والنظرية العامة

ترجمه
الدكتور أحمد السَّيَّام

مركز الدراسات العسكرية

دمشق - ١٩٨٥

تقديم

بناء على توجيهات السيد العماد نائب القائد العام - نائب رئيس مجلس الوزراء - وزير الدفاع ، قام مركز الدراسات العسكرية بترجمة كتاب « النسبية » الذي وضعه ألبرت آينشتاين صاحب النظرية نفسه ، لعرض مبادئ نظرية النسبية الخاصة والعامة في ناحيتها العلمية والفلسفية بأسلوب مبسط مما يجعله في متناول فهم القارئ العادي غير المتخصص . فالمعروف ان نظرية النسبية تكشف عن الخواص الفيزيائية والرياضية للعالم المحيط بنا ، تلك الخواص التي لا يمكن ملاحظتها عند دراسة الكون دراسة أولية ، اعتمادا على مبادئ الفيزياء الكلاسيكية (الاتباعية) .

ونظرية النسبية تعمق المفاهيم والتصورات التي كونتها العلوم الاتباعية المستندة الى مفاهيم الهندسة الاقليدية ، وتعين الحدود التي يمكن ، في نطاقها ، استخدام هذه المفاهيم كي لا تؤدي الى نتائج غير صحيحة .

مركز الدراسات العسكرية

مقدمة

يهدف هذا الكتاب ، بقدر الامكان الى اعطاء صورة داخلية دقيقة لنظرية النسبية ، لتلك الفئة من القراء الذين يهتمون بهذه النظرية ، في ناحيتها العلمية والفلسفية ، ولكنهم لا يملكون الزاد الرياضي والفيزيائي النظري الكافي . وهذا العمل يفترض توفر مستوى من الثقافة يوازي مستوى امتحان القبول في الجامعة ، وهو ، برغم صغر الكتاب ، يتطلب من القارئ قدرا من الصبر وقوة الارادة . ولم يدخر المؤلف ، في مهمته هذه ، جهدا في عرض الافكار الرئيسية بالاسلوب الابسط والاكثر للفهم ، وبصورة عامة ، في النواحي التي تتصل بواقع منشئها . وبسبب اهتمامي بالوضوح ، فقد بدا لي من غير الممكن تجنب أن أكرر افكاري مرارا عديدة ، دون أن أثير اناقة العرض أقل اهتمام . ولقد التزمت ، بكل حرص ، بأراء الفيزيائي النظري اللامع ، ل. بولتزمان L. BOLTZMAN ، الذي يقول بأن اناقة العرض يجب ان تترك للخياط وللحداء . وأنا لا ادعي بأنني قد حجبت عن القارئ الصعوبات التي تتصل بالموضوع . ومن ناحية أخرى تعمدت أن أعالج الاسس العملية للنظرية بأسلوب « زوجة الاب (١) » بحيث لا يملك القارئ اللامتمرس بالفيزياء شعور المتسكع العاجز عن رؤية الغابة بسبب أشجارها . فهل سيقدر هذا الكتاب على ان يوفر للقارئ بضع ساعات من التفكير الابداعي .

كانون الاول (ديسمبر) ، ١٩١٦

١ . آينشتاين

(١) - تعبير استخدمه الكاتب ليعني به الاسلوب المبسط .

ملاحظة على الطبعة الخامسة عشرة

لقد أضفت ، في هذه الطبعة ، كملحق خامس ، عرضا لآرائى حول المكان بصورة عامة وحول التعديلات التدريجية التى طرأت على افكارنا عن المكان كنتيجة لتأثير وجهة النظر النسبوية . وقد استهدفت ان اثبت ان المكان - الزمان ليس بالضرورة شيئا يمكن ان نمحّه وجودا منفصلا ، بصورة مستقلة عن الاغراض الفعلية للواقع الفيزيائى .

فلاشياء فيزيائية ليست فى المكان ، لكن هذه الاشياء هى ذات امتداد مكاني . وبهذا المعنى يفقد مفهوم « المكان الخالى » محتواه .

٩ حزيران (يونيو) ، ١٩٥٢

أ. آينشتاين



القسم الأول
نظرة النسبية الخاصة

١ - المعنى الفيزيائي للمقولات الهندسية .

لقد تعرف معظمكم ، انتم قراء هذا الكتاب ، أثناء مرحلة حياتكم المدرسية على البناء الشامخ لهندسة اقليدس ، وتذكرون - ربما بشعور احترام أكثر منه شعور حب - البنية الرائعة التي كان يدفعكم اليها تسنم درجها أستاذة شرفاء خلال ساعات وساعات . ولا ريب انكم ، بدافع من خبرتكم الماضية ، تنظرون بازدياد الى كل من يحاول ان ينبس بكلمة تعارض أقل المقولات شأنًا في هذا العلم . وربما راح شعور الفخر الواصل هذا يزول عنكم بمجرد ان يطرح أحد الناس عليكم السؤال التالي : « ماذا تعنون بادعائكم ان هذه المقولات صحيحة ؟ » دعونا نحاول ان نعطي لهذه المسألة بعض الاهتمام .

ان علم الهندسة ينبثق من بعض المفاهيم مثل « مستوي » و « نقطة » و « خط مستقيم » والتي نستطيع ان نعلق بها افكارا جيدة التحديد او رديثته ، كما ينبثق من خلال مقولات (مسلمات) بسيطة ننزع الى القبول بها ك « حقيقة » ، استنادا الى تلك الافكار . وعندئذ وبنتيجة تسلسل منطقي يبرره شعورنا بأن لا بد من القبول به ، يتضح لنا ان المقولات الاخرى تنبع من هذه المسلمات ، أي تبرهن بواسطتها . فالمقولة تصبح اذن صحيحة (« حقيقة ») عندما يمكن اشتقاقها من المسلمات بالطريقة المعتمدة . فمسألة « حقيقة » المقولة الهندسية المفردة تنحصر عندئذ في « حقيقة » احدى تلك المسلمات . والآن أصبحنا نعلم ان الطرائق الهندسية لاتتيح أي جواب عن السؤال المطروح أعلاه ، وليس هذا فحسب ، بل ان ذلك السؤال نفسه عديم المعنى تماما . فنحن لانستطيع ان نتساءل عن حقيقة فيما اذا كان يمر خط مستقيم واحد من نقطتين . بل نستطيع فقط ان نقول ان الهندسة الاقليدية تتعامل مع

أشياء تسمى « خطوطا مستقيمة » يتمتع كل منها حصرا بخاصة ان يتعين بنقطتين فقط تقعان عليه . فمفهوم ال « حقيقة » لا يتوقف على مراعاة الهندسة البحتة ، لاننا اعتدنا عمليا على ان نعني دوما بكلمة « حقيقة » العلاقة بفرض « واقعي » ، وعلم الهندسة ، على كل حال ، لايهتم بالعلاقة بين الافكار الواردة فيه وبين اغراض التجربة ، لكنه يهتم حصرا بالارتباط المنطقي فيما بين هذه الافكار نفسها .

وليس من الصعب ان نفهم لماذا ، وبرغم كل ذلك ، نشعر باننا مضطرون لنعت مقولات الهندسة بـ « الحقيقية » . فالافكار الهندسية تتعلق ، بدرجات متفاوتة من الصحة ، بالاشياء الموجودة في الطبيعة ، وهذه الاشياء هي بلا شك السبب الوحيد في نشوء هذه الافكار . ويجب على الهندسة ان تمتنع عن سلوك مثل هذا الطريق كي تعطي لبنيتها اوسع وحدة منطقية ممكنة . فالاعتقاد مثلا على ان نرى في « المسافة » اشارتين مرسوميتين على قضيب صلب هو شيء مترسخ في اعماق أسلوب تفكيرنا . ونحن فوق ذلك اعتدنا على ان نعتبر ان ثلاث نقط تقع على خط مستقيم ، اذا كانت مواضعها الظاهرية يمكن ان تتطابق عندما ننظر اليها بعين واحدة بعد ان نحسن اختيار المكان الذي ننظر اليها منه .

واذا اتممنا الآن ، متبعين عادتنا في التفكير ، مقولات الهندسة الاقليدية بمقولة تفيد بأن نقطتين من جسم صلب عمليا تعينان المسافة نفسها (المجال الخطي) مهما طرا على هذا الجسم من تغيرات في وضعه ، فان مقولات الهندسة الاقليدية تتحلل من تلقاء نفسها الى مقولات تخص الوضع النسبي للجسام الصلبة عمليا (١) . ان علم الهندسة المتمم بهذه الطريقة يعالج عندئذ كفرع من الفيزياء . ونستطيع الآن بحق ان نسأل عن « حقيقة » المقولات الهندسية

(١) - ينتج من ذلك ان الاجسام الطبيعية تقترن أيضا بالخط المستقيم . فالنقاط الثلاث

C, B, A من جسم صلب ، تصبح واقعة على خط مستقيم اذا اخترنا ، بعد معرفة

مكاني C, A مكان B بحيث يكون مجموع المسافتين AB, CB اصغر ما يمكن . إن

هذه الاشارة المجترة كالمية للاستمرار في موضوع حديثنا .

المفهومة بهذا المعنى ، طالما وجدنا المبرر لان نسأل فيما اذا كانت هذه المقولات محققة من اجل تلك الاشياء الواقعية التي ربطناها بالافكار الهندسية .
وبتعبير أقل دقة يمكن ان نصوغ ذلك بقولنا اننا نقصد بـ « حقيقة » المقولة الهندسية ، المأخوذة بهذا المعنى ، صلاحية استخدامها للرسم بالمسطرة والفرجار .

هذا وان اليقين بـ « حقيقة » المقولات الهندسية المفهومة بهذا المعنى يستند ، بالطبع وحسرا ، على خبرة ناقصة نوعا ما . ونحن ، في الوقت الحاضر ، نتقبل « حقيقة » المقولات الهندسية ، على اننا سنرى في مرحلة لاحقة (في نظرية النسبية العامة) ان هذه « الحقيقة » محدودة وسنعالج عندئذ مدى محدوديتها .



٢ - جملة الإحداثيات

بالاستناد الى ذلك التفسير الفيزيائي للمسافة الذي شرحناه آنفا أصبحنا في وضع يمكننا من تعيين المسافة بين نقطتين على جسم صلب بعمليات قياس . ومن أجل هذا نحتاج الى « مسافة » (قضيب s) نستخدمها في كل مرة ونتخذها كعيار قياسي . فإذا كنا الآن ازاء نقطتين A, B على جسم صلب ، أمكننا ان ننشئ الخط الذي يصل بينهما وفق قواعد الهندسة ، فانطلاقا من A يمكن ان نعين عدد المسافات S ، مرحلة بعد مرحلة ، حتى نصل الى B . فعدد العمليات المرحلية التي استلزمها هذا الاجراء هو القياس العددي للمسافة AB . ذلك هو أساس كل قياس للطول (١) .

ان كل توصيف لمسرح أي حادث ، أو أي وضع لغرض في الفضاء (٢) ، يعتمد على تحديد تلك النقطة من الجسم الصلب التي انطبق عليها الحادث أو الغرض . وهذا القول لا ينطبق على التوصيف العلمي فحسب بل ينسحب أيضا على توصيف وقائع الحياة اليومية . فإذا أمعنت النظر في تعيين الموضع : « ساحة الامويين ، دمشق » (٣) ، أتوصل الى النتيجة التالية :

ان الأرض هي الجسم الصلب الذي أنسب اليه تعيين الموضع ، وان

(١) - لقد افترضنا هنا انه لم تبقى أية قطعة من هذه المسافة، أي ان عملية القياس تعطي عددا صحيحا . وهذه الصعوبة يمكن تخطيها باستخدام قضبان - قياسية مقسمة لا يتطلب استعمالها أية طريقة جديدة تختلف أساسيا عما تقوم به .

(٢) - ان كلمة Space الاجنبية تقابل في العربية كلمتي « مكان » و « فضاء » ، وسنختار من هاتين الكلمتين ما نراه مناسبا لمقتضى المعنى . (المترجم) .

(٣) - لقد اخترنا هذا المكان كي يكون مألوفاً للقراء العرب ، بدلا من « ساحة الطرف الاغر ، لندن » الوارد في طبعة الكتاب التي بين ايدينا . (المترجم) .

« ساحة الامويين ، دمشق » هي نقطة محددة تماما كان قد اعطي اسم لها وينطبق الحادث مكانيا عليها (١) .

فالطريقة البدائية في تعيين المحل تناول حصرا المحلات الواقعة على سطح جسم صلب ، كما تتوقف على وجود نقاط على هذا السطح يمكن تمييز كل نقطة منها عن الاخرى . لكننا نستطيع ان نتحرر من هذين الحصرين كليهما دون ان نغير طبيعة طريقتنا في تعيين الموضع . فاذا كنا ، مثلا ، ازاء قيمة تحلق فوق ساحة الامويين ، فاننا نستطيع ان نعين موضعها بالنسبة لسطح الارض وذلك بانشاء عمود وفق شاقول الساحة حتى يصل الى القيمة . ان طول هذا العمود مقيسا بقضيب القياس العياري ، بالاضافة الى تعيين موطن قدم العمود ، يزودنا بتعيين تام لموضع القيمة . وعلى اساس هذا المثال العملي يمكن ان نفهم الطريقة التي امكن بواسطتها تطوير التدقيق في مفهوم الموضع .

أ - نتخيل جسما صلبا ، ننسب اليه تعيين الموضع ، ونتممه بحيث يتاح له ان يصل الى الفرض الذي نود تعيين موضعه به .

ب - في تحديد موضع الفرض ، نلجأ لاستعمال عدد (هو هنا طول العمود مقيسا بقضيب القياس العياري) بدلا من نقاط معينة ننسب اليها الموضع .

ج - نتكلم عن علو القيمة حتى ولو لم ننشأ العمود الذي يصل اليها .

فعن طريق الرصد الضوئي للقيمة من مواضع مختلفة على الارض ، وبعد ان نأخذ بعين الاعتبار خواص انتشار الضوء ، نعين طول العمود الذي يجب انشاؤه ليصل الى القيمة .

ومن خلال هذا التحليل نرى اننا نستفيد كثيرا ، في سبيل توصيف الموضع ، اذا اتيح لنا ، بقياس عددي ، ان نستغني عن العلامات الموضعية

(١) - ليس من الضروري هنا ان ندقق اكثر من ذلك في معنى الجملة « انطباع في المكان » لان مدلولها واضح بما يكفي ليجمع تفاوت الآراء حوله غير ذي أهمية في صحة استعماله .

(اسماء العلم) على الجسم الصلب الذي ننسب اليه . وفي علم القياس الفيزيائي يتاح لنا هذا بالاعتماد على جملة الاحداثيات الديكارتية .

تتألف جملة الاحداثيات هذه من ثلاثة مستويات متعامدة ومربوطة ربطا محكما بجسم صلب . فبالنسبة لهذه الجملة يتحدد مسرح اي حادث (المنطقة الرئيسية منه) بتعيين أطوال الاعمدة الثلاثة ، اي الاحداثيات (Z, Y, X) ، التي يمكن اسقاطها من مسرح الحادث على هذه السطوح المستوية الثلاثة . واطوال هذه الاعمدة الثلاثة تقاس بسلسلة من العمليات تستخدم قضبان قياس صلبة ، وفق القواعد والطرق الشائعة في الهندسة الاقليدية .

ان السطوح الصلبة ، التي تتألف منها جملة الاحداثيات ، ليست عمليا بالاشياء التي يمكن الحصول عليها . وبالإضافة لذلك ، فان قيم الاحداثيات لا تقاس عمليا بصنع قضبان صلبة ، بل بطرائق غير مباشرة . ولئن كانت نتائج علمي الفيزياء والفلك تحتفظ بوضوحها فان المعنى الفيزيائي يجب دوما ان يكون على وفاق مع الاعتبارات المذكورة آنفا (١) .

وهكذا نصل الى النتيجة التالية : ان كل توصيف للحوادث في المكان يتطلب استعمال جسم صلب ننسب الحوادث اليه . كما ان العلاقة الناتجة عن ذلك تتضمن ان قوانين الهندسة الاقليدية تظل صحيحة من أجل « المسافات » ، علما بان « المسافة » تتمثل فيزيائيا بواسطة اصطلاح العلامتين على الجسم الصلب .



(١) — ان التدقيق في هذه الصورة وفي تعديلها لن يكون ضروريا قبل ان نعالج نظرية النسبية العامة في القسم الثاني من هذا الكتاب .

٣ - المكان والزمان في الميكانيك الكلاسيكي.

ان علم الميكانيك يهتم بكيفية تغير اوضاع الاجسام في المكان بمرور الزمن . لكن ضميري سينوء بدنوب خطيرة ازاء روح الوحي المقدسة ، لو اكتفيت بالتعبير عن اهداف الميكانيك بهذه الكلمات ، دون تمحيص ودون تفسير مفصل . دعونا اذن نيسط هذه الدنوب .

ان مانعني هنا بكلمتي « وضع » و « مكان » ليس واضحا . لتصور انني واقف عند نافذة عربة قطار يمضي بسرعة منتظمة ، وانني ادع حجرا يسقط دون قذف من النافذة نحو زيق السكة . سارى عندئذ ، باهمال تأثير مقاومة الهواء ، ان الحجر يسقط في خط مستقيم . لكن الرجل الذي يراقب حركة السقوط من خارج القطار يلاحظ ان الحجر يسقط نحو الارض في خط منحن شكله قطع مكافئ . وهنا يمكن ان اتساءل : هل « المواضع » التي يمر بها الحجر تقع « في الواقع » على خط مستقيم ام على قطع مكافئ ؟ وفوق ذلك ، ماهو هنا معنى الحركة « في المكان » ؟ ان الجواب يتضح تلقائيا من الاعتبارات الواردة في الفصل السابق . فقبل كل شيء نتحاشى الكلمة الغامضة « مكان » ، التي يجب ان نعرف بأمانة اننا لانستطيع ان نشكل لها هنا اي معنى مفهوم ، ونستبدل بها عبارة « الحركة المنسوبة عمليا الى جسم مقارنة صلب » . ان الاوضاع المنسوبة الى جسم المقارنة (عربة القطار او زيق السكة) قد تعرفت منذ قليل وفي الفصل السابق بالتفصيل . فاذا ادخلنا عبارة « جملة الاحداثيات » ، التي هي فكرة مفيدة في التوصيف الرياضي ، بدلا من « جسم المقارنة » ، نكون قد اصبحنا في وضع يتيح لنا ان نقول : ان الحجر يسير في خط مستقيم بالنسبة لجملة احداثيات مربوطة ربطا صلبا بالعربة ، اما بالنسبة لجملة احداثيات مربوطة ربطا صلبا بالارض

(بالزيق) فانه يرسم قطعاً مكافئاً . وبفضل هذا المثال يتضح انه لا يوجد شيء اسمه مسار (يقال : المنحني - المحرك (١)) مستقل بوجوده ، بل يوجد حصراً مسار منسوب الى جسم مقارنة خاص .

ولكي نحصل على توصيف تام للحركة ، يجب ان ندقق في الكيفية التي يغير بموجبها الجسم موضعه بمرور الزمن ، أي اننا ، من أجل كل نقطة من المسار ، يجب ان نذكر في أي زمن كان الجسم موجوداً فيها . ان هذه المعطيات يجب ان يضاف اليها تعريف للزمن من شأنه ان يبرز هذه القيم الزمنية أساسياً على شكل مقادير (نواتج اجراءات قياس) قابلة للرصد . فاذا استندنا على أساس من الميكانيك التقليدي امكنا ان نستجيب لهذه الضرورة في مثالنا المموس بالطريقة التالية : نتصور ميكائيتين متماثلتين تماماً في كل شيء ، يمسك باحدهما الرجل الواقف عند نافذة عربة القطار ويمسك بالآخرى الرجل الواقف ساكناً قرب السكة . وعلى كل من الراصدين ان يحدد على جسم المقارنة الخاص به ، الموضع الذي يحتله الحجر لدى كل دقة من دقائق الميكائية التي يمسكها بيده . ونحن ، في هذا الامر ، لم نأخذ بعين الاعتبار الفروق الزمنية الناجمة عن محدودية سرعة انتشار الضوء . وسنعود لمعالجة هذه الصعوبة ، وصعوبة ثانية ترد هنا ، فيما بعد .



(١) - هو المنحني الذي يرسمه الجسم أثناء الحركة .

٤ - جملة الإحداثيات الغاليلية

معلوم ان قانون غاليله - نيوتن « Galilei - Newton » ، الاساسي في الميكانيك والمعروف باسم قانون العطالة ، يمكن ان ينص عليه بما يلي :

« ان الجسم البعيد بعدا كافيا عن اي جسم آخر يستمر في حالة سكون أو في حركة منتظمة في خط مستقيم . ان هذا القانون لايعبر فقط عن شيء ما بخصوص حركة الاجسام بل يشير ايضا الى اجسام مقارنة أو جمل احداثيات ، مقبولة في الميكانيك ، يمكن استخدامها في التوصيف الميكانيكي . فالنجوم المرئية الثابتة هي اجسام يصح حتما من اجلها قانون العطالة بدرجة عالية من الدقة . فاذا استخدمنا جملة احداثيات وثيقة الارتباط بالأرض ، فان كل نجم ثابت يرسم ، بالنسبة لهذه الجملة وفي حركته الفلكية اليومية ، دائرة ذات نصف قطر عظيم ، وهذه الظاهرة تتعارض مع قانون العطالة لدرجة أننا اذا التزمنا بهذا القانون وجب علينا ان ننسب هذه الحركات الى جمل احداثيات لا تتحرك بالنسبة لها النجوم الثابتة حركة دائرية . فجملة الاحداثيات التي تنسجم ، بالنسبة لها ، هذه الحركات مع قانون العطالة تسمى « جملة احداثيات غاليله » . فقوانين غاليله - نيوتن في الميكانيك يمكن ان تكون صحيحة من اجل جملة احداثيات غاليلية فقط .



٥ - مبدأ النسبية (بالمعنى المقصور)

دعونا ، في سبيل ان نبليغ اعظم وضوح ممكن ، نعد الى مثالنا في عربة القطار المفروض انه يتحرك بانتظام . نسمي حركته انسحابا منتظما (« انسحاب » لان العربة ، بالرغم من تغير موضعها بالنسبة لزيق السكة ، لا تقوم بأي دوران ، و « منتظمة » لان سرعة العربة ومنحها ثابتان) . ولنتصور ان غرابا يطير في الهواء بحيث تبدو من الزيق حركته منتظمة وفي خط مستقيم . فاذا كنا نرصد طيران الغراب من العربة المتحركة فسنجد حتما ان حركته ذات سرعة ومنحنى مختلفين عما سبق ولكنها مازال منتظمة وفي خط مستقيم . نعتبر عن هذه الظاهرة بالاسلوب التجريدي التالي . اذا كانت الكتلة m متحركة بانتظام وفي خط مستقيم بالنسبة لجملة احداثيات K ، فانها ستكون ايضا متحركة بانتظام وفي خط مستقيم بالنسبة لجملة احداثيات ثانية K' شريطة ان تكون الجملة الثانية ذات حركة انسحابية منتظمة بالنسبة لـ K . وبموجب المناقشة التي مرت في الفصل السابق ينتج مايلي :

اذا كانت K جملة احداثيات غاليلية فان كل جملة احداثيات اخرى K' تكون غاليلية ايضا عندما تكون حركتها بالنسبة لـ K انسحابية منتظمة . وبذا تكون قوانين غاليله - نيوتن صحيحة بالنسبة لـ K' تماما كما هي بالنسبة لـ K .

ونتقدم خطوة اخرى في تعميمنا هذا عندما نصوغ هذا المبدأ هكذا :

اذا كانت K' جملة احداثيات متحركة ، بالنسبة لـ K ، حركة منتظمة خالية من الدوران ، فان الظواهر الطبيعية تستمر في جريانها بالنسبة لـ K'

خاضعة تماما لنفس القوانين التي تخضع لها بالنسبة لـ K . ان هذا النص يدعى مبدأ النسبية (بالمعنى المقصور (١)) .

طالما بقي المرء مقتنعا بان كل الظواهر الطبيعية قابلة للادراك بالاستعانة بقوانين الميكانيك التقليدي ، فلا حاجة به للارتياح في صحة مبدأ النسبية هذا .

بيد انه لدى النظر في التقدم الحديث لعلمي التحريك الكهربائي والضوء ، برز بشكل اكثر فاكثر وضوحا ان الميكانيك التقليدي لايقدم اساسا كافيا للتفسير الفيزيائي لكل الظواهر الطبيعية . وبلوغ هذه النقطة اصبح السؤال عن صحة مبدأ النسبية ناضجا للمناقشة ، ولم يبد مستحيلا ان جواب هذا السؤال يمكن ان يكون سلبيا .

على ان هناك امرين عامين كانا منذ البدء في صالح صحة مبدأ النسبية . فبالرغم من ان الميكانيك التقليدي لايزودنا باساس واسع يكفي للتفسير النظري لكل الظواهر الفيزيائية ، الا انه يجب علينا ان توليه قسطا كبيرا من « الحقيقة » طالما هو يزودنا ، بخصوص حركة الاجرام السماوية الفعلية ، بدقائق التفاصيل التي تثير الاعجاب . فمبدأ النسبية لا بد ان ينطبق بدقة عظيمة في مجال الميكانيك . لكن وجود مبدأ على هذه الدرجة من العمومية وعلى هذه الدرجة من الدقة في احد مجالات الظواهر ، ولا يكون مع ذلك صالحا في سواها ، هو امر ليس ، لاول وهلة ، محتملا جدا .

والآن نعالج الدليل الثاني الذي سنعود اليه مرة اخرى فيما بعد . فلو كان مبدأ النسبية (بمعناه المقصور) غير صحيح ، فان جمل الاحداثيات الفاليلية ، K و K' و K'' ، التي يتحرك كل منها بالنسبة لكل واحد آخر حركة انسحابية منتظمة ، لاتكون عندئذ متكافئة من اجل توصيف الظواهر

(١) - يسمى الفرنسيون هذا النص مبدأ النسبية المقصورة ، اي المقصورة على جمل الاحداثيات الفاليلية ، ويسميه الانكليز والامريكيون مبدأ النسبية الخاصة (بالجمل نفسها) . (المترجم) .

الطبيعية . وفي هذه الحالة سنضطر للاعتقاد بأن قوانين الطبيعة قابلة للصياغة بشكل جد بسيط ، شريطة ان تكون طبعا قد اخترنا ، من بين كل جمل الاحداثيات الفاليلية الممكنة ، جملة واحدة K_0 ذات حركة خاصة ونتخذها جسم مقارنة ، وهذا مايسوغ لنا عندئذ (بسبب مزايا هذه الجملة في تفسير كل الظواهر الطبيعية) ان نقول عن هذه الجملة انها «في حالة سكون مطلق» . فلو كان زيق السكة ، مثلا ، هو الجملة K_0 ، فان عربة القطار ستكون عندئذ جملة K تصبح قوانين الطبيعة فيها اقل بساطة مما هي عليه في الجملة K_0 . وهذا النقص في البساطة يجب ان يعزى عندئذ الى ان العربة K لا بد ان تكون في حالة حركة « مطلقة » (اي بالنسبة لـ K_0) . ولا بد ان تؤثر قيمة سرعة العربة وجهتها في شكل قوانين الطبيعة العامة بالنسبة للجملة K . اذ يجب ، مثلا ، ان نتوقع ان النغمة الصادرة عن مزمار موضوع في منحى حركة العربة ستختلف عن النغمة المسموعة عندما يكون المزمار عموديا على منحى الحركة . هذا وان الارض في حركتها حول الشمس تشبه عربة قطار تتحرك بسرعة قريبة من ٣٠ كيلو مترا في الثانية الواحدة . فاذا كان مبدأ النسبية غير صحيح . فيجب ان نتوقع ان يتدخل منحى حركة الارض باستمرار في القوانين العامة للطبيعة ، وان نتوقع ايضا ان يتوقف سلوك الجمل الفيزيائية على اتجاهها المكاني بالنسبة للارض .

وبسبب تغير منحى سرعة حركة الارض حول الشمس خلال ايام السنة ، فان الارض لا يمكن ان تكون بالنسبة للجملة الافتراضية K_0 ، ساكنة طوال ايام السنة بكاملها . لكن اكثر الارصاد دقة لم تكشف قط اية خاصية منحوية للفضاء الفيزيائي الارضي ، اي انها لم تكشف اي خلل فيزيائي ناجم عن تغير منحى الحركة . ان هذا الواقع يشكل دليلا قويا على صحة مبدأ النسبية .



٦ - جمع السرعات المستعمل في ميكانيك التقليدي

لفترض ان رفيقتنا القديمة ، عربية القطار ، تسافر على السكة بسرعة ثابتة V (١) ، وان رجلا يعبر العربية على طولها في منحى حركة القطار بالسرعة w (٢) . فباية سرعة W يتحرك الرجل بالنسبة لزيق السكة اثناء سيره ؟ ان الجواب الوحيد البسيط يبدو ناتجا من الاعتبار التالية: اذا توقف الرجل عن السير ثانية واحدة فانه سيقطع ، اثناءها وبالنسبة لزيق السكة ، مسافة تساوي عدديا سرعة العربية V . ولكنه اذا كان سائرا اثناء هذه الفترة فسيقطع مسافة اضافية ، بالنسبة للعربة ، تساوي w فهو بالتالي سيقطع بالنسبة لزيق السكة وخلال فترة الثانية البرمنية نفسها واثناء سيره ، المسافة $W = V + w$ وسنرى فيما بعد ان هذه النتيجة، التي تعبر عن نظرية جمع السرعة المستخدمة في الميكانيك التقليدي ، لايمكن الاحتفاظ بها ، او بتعبير آخر ، ان القانون هذا الذي كتبناه ليس صحيحا في الواقع . لكننا ، مع ذلك ، سنفترض في الوقت الحاضر انه صحيح .



(١) - اي انه يقطع مسافة طولها V خلال ثانية زمنية واحدة . (المترجم) .

(٢) - اي انه يقطع ، بالنسبة للعربة ، مسافة w خلال ثانية واحدة . (المترجم) .

٧ - لنفترض اننا ندرس قانون انتشار الضوء

ومبدأ النسبية

ليس من السهل ان نجد في الفيزياء قانونا أبسط من القانون الذي يقول بأن الضوء ينتشر في الفضاء الخالي . وكل تلميذ في المدرسة يعرف، او يعتقد أنه يعرف ، ان هذا الانتشار يحدث في خط مستقيم وبسرعة عظيمة تساوي $C = 300,000$ كيلو متر/ثانية . وعلى كل حال نحن نعرف بيقين كبير ان هذه السرعة واحدة لكل الالوان بدليل ان كل الالوان الضوئية الآتية إلينا من احد النجوم تنحجب كلها دفعة واحدة عندما يحدث لهذا النجم كسوف بنجم مظلم يجاوره . ومن خلال تأملات مماثلة لهذه ، تستند على أرصاد النجوم المضاعفة ، تمكن الفلكي دوسيتير DE SITTER من اثبات ان سرعة انتشار الضوء لا يمكن ان تتعلق بسرعة حركة الجسم الذي يصدره . هذا وان افترض ان سرعة الانتشار هذه تتعلق بمنحى الانتشار « في المكان » هو امر غير محتمل بحد ذاته .

وبمختصر القول ، دعونا نفترض ان القانون الذي ينص على ثبات سرعة الضوء C (في الخلاء) يسوغه اعتقاد تلميذ المدرسة به . فمن ذا الذي كان يتصور ان هذا القانون البسيط يمكن ان يفرق الفيزيائيين في خضم من المصاعب الفكرية ؟ لنفحص اذن كيف نشأت هذه المصاعب .

علينا بالطبع ان ننسب عملية انتشار الضوء (وكل عملية أخرى في الواقع) الى جسم مقارنة صلب (جملة احداثيات) . وبمثابة جملة كهذه نتخذ زيق سكتنا السابق . ونخيل ان الهواء المحيط بها قد أزيل . فاذا أرسل شعاع على طول السكة ، نستنتج مما سبق ان مقدمة الشعاع ستنتقل

بالسرعة C بالنسبة للسكة . لنفترض من الآن ان عربة القطار تسير على السكة بالسرعة V وبنفس اتجاه انتشار الشعاع الضوئي ، ولكن بسرعة اقل بكثير من C طبعاً . فمن الواضح اننا نستطيع ان نكرر هنا المحاكمة السابقة لان مقدمة الشعاع الضوئي تلعب دور الرجل الماشي في العربة . فسرعة الرجل ، W ، بالنسبة للزريق هناك تقابلها سرعة الضوء بالنسبة للزريق هنا . فاذا رمزنا بـ W لسرعة الضوء بالنسبة للعربة نجد :

$$W = C - V$$

أي ان سرعة الشعاع الضوئي بالنسبة للعربة تغدو اصغر من C . لكن هذه النتيجة تناقض مبدأ النسبية الوارد في الفصل الخامس . ذلك لان قانون انتشار الضوء ، ككل قوانين الطبيعة الاخرى وبموجب مبدأ النسبية ، يجب ان يظل كما هو سواء بالنسبة للعربة كجسم مقارنة او بالنسبة للسكة كجمله مقارنة اخرى . لكن المحاكمة الواردة هنا تشير الى استحالة تحقق ذلك . لانه اذا كان الشعاع ينتشر بالنسبة للزريق بالسرعة C فان تلك المحاكمة تدل بالضرورة على وجوب وجود قانون انتشار آخر للضوء بالنسبة للعربة - وهذا ما يتعارض مع مبدأ النسبية .

وازاء هذا المأزق يبدو ان لاختيار لنا للخروج الا عن احد طريقين : فاما ان نبدأ مبدأ النسبية او ان نبدأ القانون البسيط لانتشار الضوء في **الخلا** . ان الذين تتبعوا منكم المناقشة السابقة بانتباه يتوقعون بما يشبه اليقين اننا لابد ان نحفظ بمبدأ النسبية لانه يشد اهتمام الدهن المفكر ببساطته وعفويته . وعندئذ لابد من ان نبدل قانون انتشار الضوء في **الخلا** بقانون اقل بساطة منسجم مع مبدأ النسبية . هذا ويدل تقدم الفيزياء النظرية اننا لانستطيع ، على كل حال ، الاستمرار في هذا الطريق . فقد أثبتت التحريات النظرية المعاصرة التي قام بها هـ .لورنتس H.A.LORENTZ على الظواهر الكهروحركية والضوئية الناجمة عن الاجسام المتحركة ان التجربة في هذا المجال تقود حصراً الى نظرية في الظواهر الكهروطيسية يبرز منها قانون

ثبتت سرعة الضوء في **الخلاء** كنتيجة محتومة . وقد كان هناك فيزيائيون نظريون كبار ينزعون الى نبد مبدأ النسبية بالرغم من واقع انه لا يوجد أية معطيات تجريبية تناقضه .

ووصولاً الى هذه الحال دخلت نظرية النسبية الى مسرح الفيزياء . وبنتيجة تحليل مفهومي الزمان والمكان الفيزيائيين اتضح في **الواقع أنه لا يوجد أي تعارض بين مبدأ النسبية وقانون انتشار الضوء** ، كما اتضح من وضع هذين القانونين على المحك بأسلوب منهجي امكانية التوصل الى نظرية متينة . وقد اطلق على هذه النظرية اسم **نظرية النسبية الخاصة** لتمييزها عن النظرية العامة التي سنعالجها فيما بعد . اما في الصفحات التالية فسنعرض الافكار الاساسية لنظرية النسبية الخاصة .



٨ - حول فكرة الزمن في الفيزياء

تصوروا ان نورين ينبثقان على السكة من مكانين A, B متباعدين. افترض بالاضافة لذلك ان هاتين الاشارتين الضوئيتين تحدثان متزامنتين^(١). فلو سألتكم اذا كان يوجد لهذا الافتراض معنى ، ستجيبون عن هذا السؤال بـ « نعم » مؤكدة . لكنني لو رجوتكم الآن ان تشرحوا لي معنى هذا الافتراض بتدقيق اكبر فستجدون بعد فترة من التفكير ان الجواب عن هذا السؤال ليس من السهولة بما يبدو لاول وهلة .

وبعد فترة من التفكير ربما يخطر لكم الجواب التالي : « ان مدلول هذا الافتراض واضح من تلقاء ذاته ولا يحتاج الى أي شرح اضافي ، وقد يلزمني بالطبع قسط من انعام النظر اذا طلب الي ان اعين بالرصد ، وفي الحالة الراهنة ، فيما اذا كان الحادثان يقعان متزامنين ام لا . » لكنني لن ارضى بهذا الجواب؛ للسبب التالي . لنفترض ان انسانا خبيرا بعلم القياس تمكن، بنتيجة تأملات عبقرية ، ان يستنبط ان الاشارتين الضوئيتين تقعان دوما في لحظة واحدة ، لابد له هندئذ من ان يقوم بالتجربة كي يعلم فيما اذا كان استنتاجه النظري يتفق مع الواقع ام لا . ونحن نصادف هذه الصعوبة لدى كل افتراض فيزيائي يتدخل فيه مفهوم « التزامن » ذلك لانه لاوجود عند الفيزيائي لاي مفهوم مالم يتمكن ، عمليات وفي كل حالة ، من اكتشاف واقعيته او عدمها . وهكذا نحتاج الى تعريف للزمان يزودنا بطريقة نستطيع بواسطتها في مثالنا الراهن ، ان نقرر بالتجربة فيما اذا كانت الاشارتان الضوئيتان تقعان متزامنتين ام لا . وطالما بقيت الحاجة الى هذا التعريف غير مقضية ، يحق

(١) أي في زمن واحد ، وقد نقول في لحظة واحدة . (المترجم) .

لي ان اذمر كفيزيائي (وهذا القول يصح بالطبع ولو لم اكن فيزيائيا) عندما اتصور انني قادر على ايجاد مدلول لفرضية التزامن . (اود ان اوصي القارئ ان لا يستمر في القراءة قبل ان يقتنع بهذا الامر) .

وبعد التفكير في هذا الموضوع مليا قد تعرضون الاقتراح التالي للتحقق من التزامن : نقيس المسافة AB على السكة ونضع راصدا في منتصفها M . ونزود هذا الراصد بجهاز (بمرايتين تصنعان بينهما زاوية قائمة ، مثلا (١)) يتيح له ان يرى الكائنين A, B دفعة واحدة . فاذا رأى الراصد الاشارتين الضوئيتين في لحظة واحدة ، نقول انهما متزامنتان .

انني مسرور جدا من هذا الاقتراح ، ولكنني لايمكن ان اعتبر انه قد حل المشكلة نهائيا ، فانا اشعر انني مضطر لان اثير الاعتراض التالي : « ان هذا التعريف لل التزامن لن يكون بالتأكيد صحيحا الا اذا ايقنت ان الضوء ، الذي يرى الراصد M بفضل الاشارتين الضوئيتين ، يقطع المسافة $A \leftarrow M$ بالسرعة التي يقطع بها المسافة $B \leftarrow M$. لكن فحص هذا الافتراض لايمكن ان يتم الا اذا كنا مزودين سلفا بما يتيح لنا قياس الزمن . ومن هذه المناقشة يظهر لنا اننا ندور هنا في حلقة مفرغة .

وبعد تفكير ملي ترمقونني بنظرة فيها شيء من عدم الاكتراث - ولكم الحق - ثم تقولون : « نحن متمسكون مع ذلك بتعريفنا السابق ، لانه لايفترض مطلقا اي شيء بخصوص الضوء . والشيء الوحيد الذي يتطلبه تعريف التزامن هذا هو وجوب ان يمكننا من اتخاذ قرار عملي حول ما اذا كان المفهوم الذي نستهدف تعريفه قد حصل ام لا . وهذا الشرط محقق بلا ريب في التعريف الذي افترضاه . اما شرط ان يكون الضوء قد استغرق فترة واحدة على الطريق $A \leftarrow M$ وعلى الطريق $B \leftarrow M$ فليس هو افتراضا ولا فرضية بخصوص الطبيعة الفيزيائية للضوء ، انما هو مصطلح يمكن ان اعتمده بملء حريتي كي اتوصل الى تعريف لل التزامن » .

(١) - يضع الراصد هذا الجهاز امام عينيه بحيث يكون الحرف المشترك للمرايتين شاقوليا وبحيث تكونان متساويتين الميل على المستقيم AB ، فيرى عندئذ فيهما خيالي النقطتين A, B في منحنى واحد عمودي على المستقيم AB (المترجم) .

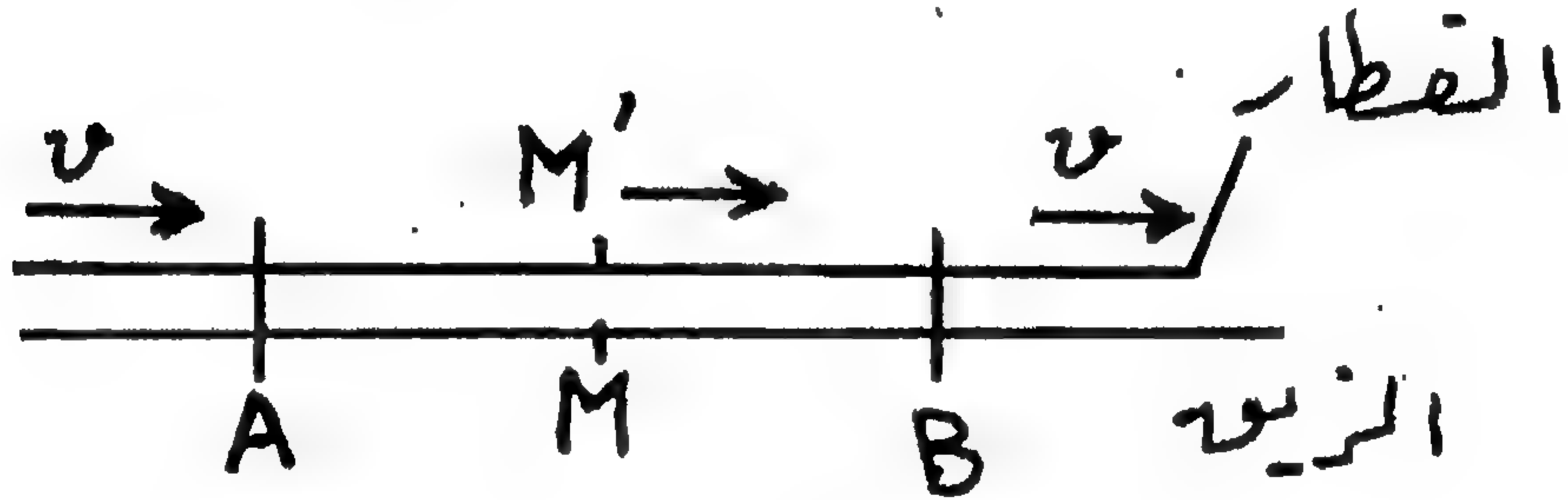
من الواضح ان هذا التعريف يمكن ان يستخدم لاعطاء معنى سديد لا لتزامن الحادثين الاثنين فحسب بل لتزامن اي عدد من الحوادث اهتم باختيارها ، وبصورة مستقلة عن المواضع التي تقع فيها هذه الحوادث بالنسبة لجسم المقارنة (١) (زيق السكة هنا) . وبذلك نجد انفسنا مسوقين الى تعريف « الزمن » في الفيزياء . ولاجل ذلك نفترض ميقاتيات متماثلة التركيب موضوعة في النقاط A و B و C من خط السكة (جملة الاحداثيات) وانها منظمة بحيث تكون اوضاع عقاربها متطابقة بالتزامن (بالمعنى المفهوم اعلاه) . ضمن هذه الشروط نفهم « زمن » الحادث، بمعنى انه الوضع (وضع العقربين) الذي نقرأه على الميقاتية الواقعة في الجوار (في المكان) القريب جدا من الحادث . وبهذه الطريقة نقرن « قيمة الزمن » بكل حادث يتصف اساسيا بامكانية رصده .

ان هذا الاصطلاح ينطوي على فرضية فيزيائية اضافية من الصعب ان ترتب في صحتها دون اثبات عملي للفرضية المضادة لها . فقد قبلنا ان جميع هذه الميقاتيات تعمل بايقاع واحد اذا كانت متطابقة التركيب . وبتعبير أدق نقول : اذا كانت الميقاتيتان الساكنتان في مكانين مختلفين من جسم مقارنة منظمين بحيث يتزامن (بالمعنى المعتمد اعلاه) احدى اوضاع عقارب احدهما مع وضع مماثل لعقارب الاخرى ، فان هذا « التزامل » بين نظامي سير الميقاتيتين يبقى متزامنا (بالمعنى المعتمد تعريفه اعلاه) دوما .

(١) - نفترض أيضا انه : عندما تقع ثلاثة حوادث A و B و C في ثلاثة امكنة مختلفة وبحيث يكون A و B متزامنين وكذلك C و B متزامنين (بالمعنى المعتمد اعلاه) فان معيار التزامن يتحقق عندئذ أيضا بين C و A . ان قبول هذه النتيجة يتضمن فرضية بخصوص قانون انتشار الضوء . وهي بالتأكيد محققة عندما نتمسك بقانون لبات سرعة الضوء في الخلاء .

٩ - نسبة التزامن

لقد استفدنا في محاكمتنا حتى الآن على وجود جسم مقارنة جسدينا بـ « زيق السكة » . نتصور الآن قطارا طويلا جدا يسير على السكة بسرعة V ثابتة وبالاتجاه المرسوم على الشكل (١) . فمن الملائم للمسافرين ان



الشكل رقم - ١ -

يتخذوا القطار نفسه جسم مقارنة صلب (جملة احداثيات) ، فهم يرون كل الحوادث كما تبدو من القطار . فكل حادث يقع في موضع من السكة يقع ايضا في نقطة معينة من القطار . وهنا ايضا يمكن اعطاء التزامن بالنسبة للقطار تعريفا يماثل تماما تعريف التزامن بالنسبة للزريق . وكنتيجة طبيعية لذلك يبرز السؤال التالي :

هل الحادثان (الاشارتان الضوئيتان في B, A) المتزامنان بالنسبة للزيق السكة يكونان متزامنين ايضا بالنسبة للقطار ؟ سنبرهن فورا ان الجواب عن هذا السؤال هو النفي .

ف عندما نقول ان الاشارتين النابعتين من B, A متزامنتان بالنسبة

للزريق فاننا نعني ان الشعاعين الصادرين عن المكانين A, B ، حيث حدثت الاشارتان ، يلتقيان في نقطة المنتصف من المسافة AB على الزريق .

لكن الحادثين A, B يقابلان ايضا موضعين A, B على القطار .
لتكن M نقطة منتصف المسافة AB على القطار المسافر . ففي لحظة حدوث
الاشارتين بالضبط (١) ، تكون هذه النقطة M منطبقة طبعا على النقطة M ،
ولكنها متحركة نحو يمين المخطط في الشكل (١) بسرعة القطار V . فاذا وجد
راصد في الموضع M من القطار وكان لا يتمتع بهذه السرعة فسيبقى دوما
في M وسيصل الضوءان الآتيان من A, B اليه متزامنين ، اي انهما
سيلتقيان في مكان وجوده بالضبط . ولكنه ، في واقع الامر ، يسرع (بالنسبة
لزريق السكة) نحو الشعاع الضوئي الآتي من B ، بينما هو يهرب من الشعاع
الضوئي الآتي من A . وبذلك يرى هذا الراصد النور الآتي من B قبل ان
يرى النور الآتي من A . فالراصد الذي يتخذ القطار كجمله مقارنة سيجد
حتما ان الاشارة الضوئية قد انطلقت من B قبل ان تنطلق الاشارة الضوئية
من A . وهكذا نتوصل الى النتيجة الهامة التالية :

ان الحوادث المتزامنة بالنسبة للزريق ليست متزامنة بالنسبة للقطار
والعكس بالعكس (نسبة التزامن) . فكل جسم مقارنة (جملة احداثيات)
لها زمنها الخاص بها . وما لم نعلم جسم المقارنة الذي ننسب الزمن اليه
فليس ثمة معنى لاي قول عن زمن الحادث .

هذا وقبل اكتشاف نظرية النسبية كان يعتقد ضمنا في الفيزياء ان
الزمن مفهوم ذو معنى مطلق ، اي انه مستقل عن الحالة الحركية لجسم
المقارنة . لكننا راينا هنا ان هذا الاعتقاد يتناقض مع اكثر تعاريف التزامن
عفوية وتلقائية . فاذا تخيلنا عن هذا الاعتقاد فسيزول التناقض بين قانون
سرعة الضوء في الخلاء وبين مبدأ النسبية (المشروح في الفصل السابع) .
ولقد وقلعنا في هذا التناقض نتيجة الاعتبارات التي اوردناها في الفصل

(١) - كما نحكم على ذلك من زريق السكة .

السادس والتي لم تعد واردة بعد الآن . ففي ذلك الفصل استنتجنا ان الرجل الماشي في العربة والذي يقطع المسافة w في الثانية الزمنية بالنسبة للعربة ، يقطع المسافة نفسها ايضا بالنسبة لزريق السكة في كل ثانية زمنية . لكننا وبموجب الاعتبارات الواردة هنا، نجد ان المدة التي يستغرقها بالنسبة للعربة حدث معين لا يمكن ان تساوي المدة التي يستغرقها الحدث نفسه منظورا اليه من الزريق (كجسم مقارنة) . وبذلك لا يمكن ان نستنتج ان الرجل الماشي يقطع بالنسبة لخط السكة المسافة w اثناء مدة تساوي ثانية واحدة من الزمن المقيس من الزريق .

وفوق ذلك ، فان الاعتبارات الواردة في الفصل السادس ماتزال تستند على مصطلح ثان يبدو اعتباطيا في ضوء المحاكمة البحتة ، بالرغم من انه كان مقبولا بشكل ضمني حتى قبل ادخال نظرية النسبية .



١٠ - نسبية مفهوم المسافة

لنعتبر نقطتين معينتين من القطار المسافر بالسرعة V بالنسبة لزيق السكة ، ولنحصر اهتمامنا بالمسافة التي تفصل بينهما . لقد عرفنا منذ قليل ان من الضروري أن نملك جسم مقارنة ننسب اليه المسافة عندما نستهدف اجراء عملية قياس لها . ان أبسط مايمكن ان نفعله بهذا الصدد هو اختيار القطار نفسه كجسم مقارنة (جملة احداثيات) . فالراصد الموجود في القطار يقيس هذه المسافة بواسطة قضيب القياس الذي لديه وبعدد المرات التي تحويها هذه المسافة من طول القضيب بدءا من أحد طرفي المسافة حتى طرفها الآخر على خط مستقيم (على طول أرض العرببة مثلا) . ان عدد المرات المحصول عليه بهذه الطريقة هو قياس المسافة المطلوبة .

لكن اجراء قياس هذه المسافة نفسها ونحن على زيق السكة امر مختلف تماما . فهنا تنطرح من تلقاء ذاتها الطريقة التالية : اذا رمزنا بـ A' و B' للنقطتين على القطار المسافر واللتي نستهدف قياس المسافة بينهما ، فان هاتين النقطتين متحركتان بسرعة واحدة V على طول الزيق . فقبل كل شيء يلزمنا ان نعين على الزيق النقطتين A , B اللتين تقابلان ، تماما ومواجهة ، النقطتين A' و B' في لحظة الزمن الخاصة t - كما نعينها من الزيق . ان هاتين النقطتين A , B على الزيق يمكن ان تتعينا بتطبيق تعريف الزمن الوارد في الفصل الثامن . أما المسافة بين هاتين النقطتين A و B فتقاس بطريقة التطبيق المتكرر لقضيب القياس على طول الزيق .

ليس من المؤكد سلفا ان هذا القياس الثاني سيعطي نتيجة مطابقة لما يعطيه القياس الاول . وعندئذ يكون طول القطار كما يقاس من زيق السكة مختلفا عن الطول المحصول عليه كما يقاس في القطار نفسه . وهذه الحال تقودنا الى اعتراض ثان يجب اثارته ضد المحاكمة الواضحة ظاهريا ، التي وردت في الفصل السادس . اي : اذا كان الرجل في العربة يقطع المسافة w في واحدة الزمن — كما يقاس من القطار — فان هذه المسافة — كما تقاس من الزيق — لن تكون اذن بالضرورة مساوية w .



١١ - تحويل لورنتس

ان نتائج الفصول الثلاثة السابقة ترينا ان التناقض الظاهري بين قانون انتشار الضوء ومبدأ النسبية (الفصل السابع) قد برز من خلال محاكمة مستمدة من فرضيتين غير مسوغتين مأخوذتين من الميكانيك التقليدي ، وهما:

١ - ان الفاصل الزمني (الزمن) بين حادثين مستقل عن ظروف حركة جسم المقارنة .

٢ - ان الفاصل المكاني (المسافة) بين نقطتين على جسم صلب مستقل عن ظروف حركة جسم المقارنة .

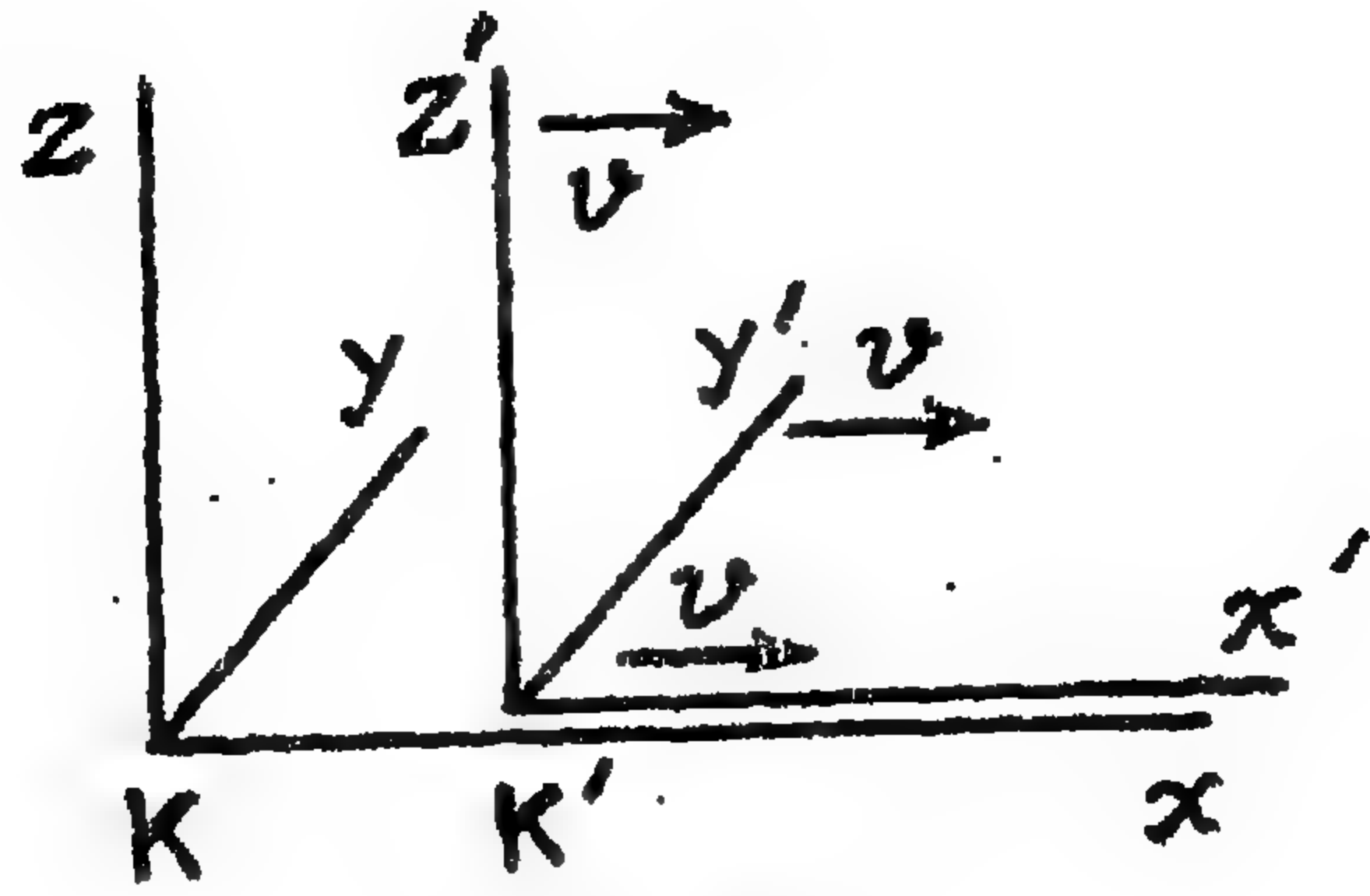
فاذا نبدنا هاتين الفرضيتين ، فان التناقض الوارد في الفصل السابع يزول ، لان نظرية جمع السرعة التي استخرجناها في الفصل السادس تفقد صحتها . وعندئذ تتاح من تلقاء نفسها امكانية ان ينسجم قانون انتشار الضوء في الخلاء مع مبدأ النسبية ، كما ينطرح السؤال التالي : كيف يجب ان نعدل محاكمات الفصل السادس كي نزيل الاختلاف بين النتيجةين الاساسيتين للخبرة التجريبية ؟ ان هذا السؤال يقود الى سؤال عام . ففي المناقشة الواردة في الفصل السادس كنا نتعامل مع امكنة وازمنة منسوبة كلها الى القطار تارة والى الزيق تارة اخرى . فكيف نستطيع ان نجد مكان وزمان حادث كما يبدو ان من القطار عندما نعرف مكان وزمان الحادث نفسه كما يبدو ان من زيق السكة ؟ هل يوجد لسؤال من هذا القبيل جواب تفكري يزيل التناقض بين قانون انتشار الضوء في الخلاء ومبدأ النسبية ؟ وبتعبير آخر : هل يمكن ان نتصور علاقة بين مكان الحادث الواحد وزمانه منسويين الى كلا جسمي المقارنة بحيث يكون لكل شعاع ضوئي سرعة انتقال واحدة C

سواء بالنسبة لزيق السكة او بالنسبة للقطار ؟ ان هذا السؤال يقود الى جواب ايجابي محدد تماما ، والى قانون تحويل محدد تماما يتناول قيم المكان-الزمان للحدث وينقلنا من جسم مقارنة الى جسم مقارنة آخر .

قبل ان نعالج هذا الموضوع نسوق الامور العابرة التالية . لقد تناولنا حتى الآن حوادث تقع على طول الزيق ، مما يجعلنا ندخل تابعا رياضيا لنقطة موجودة على خط مستقيم . ففي الاسلوب المشار اليه في الفصل الثاني يمكن ان نتخيل جسم المقارنة هذا مكتملا جانبيا وفي مناح متعامدة بواسطة شبكة من القضبان ، بحيث نستطيع ان نحدد مكان أي حادث بالنسبة لشبكة القضبان هذه . كما يمكن ان نتخيل القطار المسافر بالسرعة V ممتدا عبر الفضاء كله ، بحيث ان كل حادث ، مهما كان بعيدا ، يمكن أيضا ان نحدد مكانه بالنسبة لشبكة القضبان الثانية (١) ودون ان نركب أي خطأ جوهري يمكن ان نضرب صفحا عن واقع ان هاتين الشبكتين ستتصادمان معا باستمرار بسبب عدم امكانية تداخل الاجسام الصلبة . وسنتخيل في كل شبكة من هذا النوع ثلاثة سطوح متعامدة نتخذها « مستويات احداثيات » (« جملة احداثيات ») . سنرمز عندئذ بـ K لجملة الاحداثيات المربوطة بزيق السكة و بـ K' لجملة الاحداثيات المربوطة بالقطار . فاي حادث ، حيثما وقع ، سيتعين في الفضاء وبالنسبة لـ K بواسطة اطوال الاعمدة الثلاثة x, y, z على مستويات الاحداثيات ، وبالنسبة للزمن بالقيمة الزمنية t . اما بالنسبة لـ K' فيتعين الحادث نفسه مكانيا وزمانيا بالقيم المقابلة x', y', z', t' التي تختلف طبعا عن x, y, z, t . وقد شرحنا من قبل وبالتفصيل كيف يمكن لهذه القيم ان تعتبر نتائج لعمليات قياس فيزيائي .

من الواضح الآن ان مسألتنا يمكن تماما ان تصاغ على النحو التالي .

(١) - الموجودة في هذا القطار الهائل الحجم (المترجم) .



الشكل رقم ٢ -

كيف يمكن ان نحسب القيم x', y', z', t' للحدث منسوباً الى K' عندما نعطي القيم x, y, z, t للحدث نفسه منسوباً الى K ؟ ان العلاقات المطلوبة يجب ان تختار بحيث تستجيب لقانون انتقال الضوء في الخلاء ، من اجل الشعاع الضوئي الواحد نفسه (وبالطبع من اجل اي شعاع آخر) ، سواءاً بالنسبة لـ K او لـ K' . ان العلاقات التالية ، من اجل التوجيه النسبي لجملتي الاحداثيات المرسومتين في الشكل (٢) ، تستجيب لهذا الشرط :

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

ان مجموعة المعادلات هذه معروفة باسم « تحويل لورنتس » . (١) « LORENTZ » .

هذا ولو كنا اتخذنا ، بدلا من قانون انتقال الضوء ، الافتراضات التي ينطوي عليها الميكانيك التقليدي حيث المسافة والزمن مقداران مطلقان (٢) ،

(١) - نشرح في الملحق ٢ طريقة بسيطة لاجاد تحويل لورنتس .

(٢) - اي لانتوقف قيمتهما على الحالة الحركية للراصد الذي يقيسهما . (المترجم) .

مستندا لايجاد تحويل يستجيب لهذه الافتراضات لوجدنا ، بدلا من التحويل السابق ، المعادلات التالية :

$$\begin{aligned}x' &= x - vt \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t\end{aligned}$$

وتسمى مجموعة المعادلات هذه « تحويل غاليله » . ويمكن الحصول عليها من تحويل لورنتس باعطاء سرعة الضوء C فيه قيمة لامتناهية في الكير .

يمكن ان نبرهن فورا ، بالاستناد الى تحويل لورنتس ، على ان قانون انتقال الضوء في الخلاء محقق في كلا جملتي المقارنة K و K' . فالاشارة الضوئية المرسلة على طول محور الفواصل X وبالاتجاه الموجب تتقدم عليه وفق المعادلة (١) :

$$x = ct$$

اي بالسرعة C . وبموجب معادلات تحويل لورنتس تقود هذه العلاقة البسيطة بين t, x الى علاقة بين t, x' و . فاذا بدلنا x بالقيمة ct في المعادلتين ، الاولى والرابعة من تحويل لورنتس ، نحصل على :

$$\begin{aligned}x' &= \frac{(c - v)t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\t' &= \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right)t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\end{aligned}$$

وبتقسيم هاتين المساواتين طرفا على طرف نجد فورا : $x' = ct'$

(١) - التي هي قانون انتقال الضوء على محور الفواصل X (اي بالنسبة ل K)
(المترجم) .

مما يدل على ان الضوء ينتشر بالنسبة لـ K' طبقا لهذه المعادلة . وفيها نرى ان سرعة انتقال الضوء ، كما تقاس من جملة المقارنة K' تساوي C ايضا . ونحصل على النتيجة نفسها لو اعتبرنا شعاعا ضوئيا ينتشر على اي منحى آخر . وليس هذا بالطبع امرا مستغربا لان معادلات تحويل لورنتس قد اوجدت لتستجيب له .



١٢ - سلوك قضبان القياس والميكانيات المتحركة

أضع قضيباً - متراً على محور x' من $x'=0$ بحيث ينطبق أحد طرفيه (مبدؤه) على النقطة $x'=0$ بينما ينطبق طرفه الآخر (نهايته) على النقطة $x'=1$. فما هو طول القضيب - المتر بالنسبة للجملة K ؟ لكي نعلم ذلك نحتاج فقط لمعرفة أين يقع مبدؤه ونهايته بالنسبة لـ K في لحظة معينة في الجملة K . فمن المعادلة الأولى في تحويل لورنتس نجد إحداثيي هاتين النقطتين في اللحظة $t=0$:

$$x = 0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (\text{مبدأ القضيب})$$

$$x = 1 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (\text{نهاية القضيب})$$

أما المسافة بين النقطتين فهي إذن $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. لكن القضيب - المتر

متحرك بالسرعة v بالنسبة لـ K . فينتج من ذلك ان طول القضيب - المتر

الصلب المتحرك في منحى طوله بالسرعة v يساوي $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ من المتر .

فالقضيب الصلب هو ، في حالة الحركة ، أقصر منه وهو في حالة السكون ، وكلما ازدادت سرعته يتقاصر أكثر فأكثر . وعندما يبلغ سرعة الضوء

(أي $v = c$) نجد $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0$ ، وعندما تصبح سرعته أعظم من

سرعة الضوء في الخلاء فان الجذر التربيعي يصبح تخيلياً . ومن هذا نستنتج

ان سرعة الضوء تلعب في نظرية النسبية دور سرعة حدية لا يمكن لأي جسم حقيقي ان يبلغها ولا ان يتجاوزها .

وهذه الصفة التي تتسم بها سرعة الضوء C ، كسرعة حدية ، تبرز طبعا وبوضوح من معادلات تحويل لورنتس ، لان هذه المعادلات تصبح عديمة المعنى اذا اعطينا V قيمة اعظم من C

واذا اعتبرنا ، على العكس من ذلك ، قضيبا — مترا في سكون بالنسبة لـ K على طول المحور x ، فسنجد عندئذ ان طول القضيب ، كما يبدو من الجملة K' يساوي $\sqrt{1-v^2/c^2}$ وهذا يتفق تماما مع مبدأ النسبية الذي يشكل اساس محاكماتنا .

كما انه من الواضح سلفا اننا لابد قادرون على ان نعلم شيئا بخصوص سلوك قضبان القياس والميقاتيات ، وذلك من معادلات التحويل ، لان قيم x, y, z, t ليست اقل ولا اكثر من نتائج قياس يمكن الحصول عليها بواسطة قضبان قياس وميقاتيات . فلو كنا استندنا في محاكماتنا على تحويل غاليله لما كنا حصلنا على تقلص القضيب اثناء الحركة .

لنعتبر الآن ميقاتية تدق الثانية موضوعة بسكون بالنسبة لـ K' في نقطة المبدأ $(x'=0)$. ليكن $t=0$ و $t'=1$ دقتين متواليتين من هذه الميقاتية .

نجد عندئذ من المعادلتين ، الاولى والاخيرة من تحويل لورنتس ان زماني هاتين الدقتين كما يبدوان من K هما :

$$t=0 \quad (\text{للدقة الاولى})$$

$$t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (\text{للدقة الثانية})$$

ان الميقاتية ترى من الجملة K متحركة بالسرعة v ، والمدة الزمنية التي تنقضي بين دقتين متواليتين هي ، كما تبدو من الجملة K ، لانساي ثانية واحدة بل تساوي $\sqrt{1-v^2/c^2}$ من الثانية . أي مدة أطول بقليل . وهكذا يبدو عقرب الميقاتيات المتحركة أبطأ في حركته مما يكون في حالة السكون (١) . فهنا أيضا تلعب السرعة C دور سرعة حدية لا يمكن تجاوزها .



(١) - أي أن الراصد الذي يقارن ميقاتيته بميقاتية رجل آخر متحرك بالنسبة له يرى ان ميقاتية الرجل الآخر تقصر عن ميقاتيته الخاصة . كما أن هذا الرجل الآخر يرى ، هو أيضا ، ميقاتية الراصد تقصر عن ميقاتيته الخاصة . فليس ثمة فرق أساسي بين الراصد والرجل الآخر . وهذا القول ينسحب أيضا على ظاهرة تقاصر القضببان أثناء الحركة . وهذه سمة منطقية من سمات نظرية النسبية لان المهم فيها هو الحركة النسبية لاجل الراصدين (بالنسبة للآخر) . (المترجم) .

١٣ - جمع السرعات النسبوي (تجربة فيزو)

يمكننا عمليا الآن ان نحرك الميقاتيات وقضبان القياس بسرعات صغيرة بالنسبة لسرعة الضوء ، وعلى هذا ، لن نتمكن الا بصعوبة من مقارنة نتائج الفصل السابق مباشرة بما يحدث في الواقع . بيد ان هذه النتائج لابد ان تذهلكم بغرابتها الشديدة . ولهذا السبب اعتمد الآن الى ايراد نتيجة اخرى يمكن استخلاصها من الاعتبارات السالفة ويمكن ان نضعها بيسر على محك التجربة .

لقد استخرجنا في الفصل السادس نظرية جمع السرع المتفقة في الاتجاه وعلى الشكل الذي تقود إليه فرضيات الميكانيك التقليدي . ان هذه النظرية يمكن أيضا ان تنتج من تحويل غاليله مباشرة (الفصل ١١) . فبدلا من ان ندخل رجلا يمشي داخل العربة ، نعتبر نقطة متحركة بالنسبة لجملة K' الاحداثيات K' وفقا للمعادلة :

$$x' = wt'$$

فاذا وضعنا فيها صيغتي x' و t' الواردتين في تحويل غاليله بدلالة x و t نجد المعادلة :

$$x = (v + w)t.$$

وهي ليست سوى قانون حركة النقطة المعتبرة بالنسبة للجملة K (حركة الرجل بالنسبة لزيق السكة) . سنرمز لهذه السرعة بالرمز w وعندئذ نكتب ، كما في الفصل (٦) .

$$W = v + w \quad (ب)$$

على أننا يمكن تماماً ان نطبق هذه المحاكمة بالاستناد الى نظرية النسبية .
ولاجل ذلك علينا ان نبذل في المعادلة

$$x' = \gamma(x - vt)$$

γ و γ' بدلالة v و v' كما هما في المعادلتين ، الاولى والرابعة من تحويل لورنتس . وعندئذ وبدلاً من المعادلة (ب) نحصل على المعادلة :

$$(ج) \quad W = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{c^2}}$$

التي تعبر عن نظرية جمع السرعة المتفقة في المنحى بالانسجام مع مبدأ النسبية . والآن ، أي من المعادلتين (ب) و (ج) هي الاحسن اتفاقاً مع التجربة ؟

وعند هذه النقطة تجلو الموقف لنا تجربة هامة جداً قام بها الفيزيائي اللامع فيزو FIZEAU منذ اكثر من قرن من الزمان ، وقد كرر هذه التجربة عدد من احسن الفيزيائيين المجريين ، حتى لم يعد هناك أي شك في نتيجتها . تتناول هذه التجربة المسألة التالية :

ضوء يخترق بالسرعة المحددة W سائلاً عديم الحركة . لنفرض الآن ان السائل يجري في الانبوب T بالسرعة V (الممثلين على مخطط الشكل ٣) باتجاه السهم المرسوم . فما هي عندئذ سرعة الضوء في هذا السائل المتحرك ؟

من المفروغ منه ، طبقاً لمبدأ النسبية ، ان انتشار الضوء سيكون دوماً بالسرعة W ، سواء كان السائل ساكناً او متحركاً بالنسبة لأي جسم مقارنة آخر .

فسرعة الضوء بالنسبة للسائل وسرعة السائل بالنسبة للانبوب هما ، اذن معروفتان ، ونريد ان نعرف سرعة الضوء بالنسبة للانبوب .



الشكل رقم ٣ -

لقد كنا في الفصل ٦ امام مسألة مماثلة . فالانبوب هنا يقابل زيق السكة هناك اي جملة الاحداثيات K ، والسائل هنا يقابل العربية هناك اي جملة الاحداثيات K' ، وأخيرا يقابل الضوء هنا الرجل الماشي في العربية هناك او النقطة المتحركة في الفصل الراهن . فاذا رمزنا بـ W لسرعة الضوء بالنسبة للانبوب ، فاننا نستطيع ان نحسب هذه السرعة اما من المعادلة (ب) واما من المعادلة (ج) ، حسيما نستند الى تحويل غاليله او الى تحويل لورنتس . وقد كان ان حكمت التجربة (١) لصالح المعادلة (ج) المشتقة من مبدأ النسبية ، وكان الحكم حاسما ودقيقا .

وبموجب القياسات الحديثة الممتازة التي قام بها زيمان **ZEEMAN** اتضح ان تأثير سرعة الجريان V على انتشار الضوء يستجيب للمعادلة (ج) بارتياح لايزيد عن واحد في المئة .

على اننا لا بد لنا من ان نلفت النظر هنا الى واقع ان نظرية هذه الظاهرة قد أعطاها لورنتس قبل استتباب نظرية النسبية بزمان طويل . بيد ان نظرية لورنتس ذات طبيعة كهر حركية صرفة وكان قد تم استنباطها باستعمال فرضيات خاصة بخصوص البنية الكهروطيسية للمادة . بيد ان هذا الامر لا ينتقص ، على أية حال ، من قيمة نتيجة التجربة كمحك يحكم لصالح نظرية النسبية ، لان علم التحريك الكهربائي الذي ابتدعه مكسويل **MAXWELL** ولورنتس ، والذي كانت تستند اليه النظرية الاولى ، لا يتناقض بتاتا مع نظرية النسبية . بل ان النظرية الاولى قد نمت بالاحرى من علم التحريك الكهربائي كنتيجة مدهشة لتراكب وتعميم هذه الفرضيات التي كانت في الاصل مستقلة فيما بينها وكانت تشكل اساسا لبناء علم التحريك الكهربائي.

(١) - لقد وجد فيرو ان $W = w + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$ حيث $n = \frac{c}{w}$ قرينة انكسار

السائل . ومن جهة اخرى ، ونظرا لصغر الكسر $\frac{vw}{c^2}$ امام الواحد ، يمكن ان نضع صيغة

المعادلة (ج) على الشكل $W = (w + v) \left(1 - \frac{vw}{c^2} \right)$ ، او برتبة الحساب

التقريبي نفسها ، على الشكل $w + v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$ الذي يطابق النتيجة التي

حصل عليها فيرو .

١٤- القيمة النسبية لنظرية النسبية

ان القطار الذي تخيلناه في الصفحات السابقة يمكن تلخيصه على النحو التالي .

لقد اقنعنا التجربة ، من جهة أولى ، ان مبدأ النسبية صحيح ، ومن جهة ثانية ان سرعة انتقال الضوء في الخلاء يجب اعتبارها ثابتة على القيمة C . وبضم هاتين الفكرتين توصلنا الى قانون تحويل بخصوص احداثيات الحادث المتعامدة x و y و z وزمنه t التي تمثل بمجموعها سلوك الطبيعة . وضمن هذه الشروط لم نتوصل الى تحويل غاليله لكننا ، وخلافا لما يقتضيه الميكانيك التقليدي ، توصلنا الى تحويل لورنتس .

ان قانون انتقال الضوء ، الذي تسوغ معارفنا العملية قبولنا به ، يلعب دورا هاما في آلية تفكيرنا . فبعد ان يصبح بحوزتنا تحويل لورنتس يمكن ، في كل الاحوال ، ان نضمه الى مبدأ النسبية وان نوجز النظرية كما يلي :

ان كل قانون طبيعي عام يجب ان يكون مصوغا بحيث يتحول الى قانون له الشكل نفسه عندما ندخل ، بدلا من المتحولات المكانية - الزمانية X ، y ، z ، t المنسوبة الى جملة الاحداثيات K ، متحولات مكانية - زمانية x ، y ، z ، t منسوبة الى جملة احداثيات K' . وفي هذا الصدد ترتبط المقادير المفتوحة بالمقادير اللامفتوحة بواسطة تحويل لورنتس . وبمختصر القول نقول : ان قوانين الطبيعة العامة متوافقة التغير (١) بالنسبة لتحويل لورنتس .

(١) - تعبير رياضي (Covariant) من الواقع الفيزيائي المقروح هذا . (المترجم) .

ان هذا شرط رياضي محدد تتطلبه نظرية النسبية من القانون الطبيعي (التجريبي) ، وبموجبه تصبح النظرية وسيلة ذات قيمة مجدية لدى البحث عن قوانين الطبيعة العامة . فاذا صادفنا قانونا تجريبيا لا يحقق هذا الشرط تكون عندئذ احدى فرضيتي النظرية الاساسيتين ، على الاقل ، قد انتقضت . دعونا اذن الآن نفتش عن النتائج العامة التي نبدتها نظرية النسبية .



١٥ - النتائج العامة للنظرية

يتضح من محاكماتنا السابقة ان نظرية النسبية (الخاصة) قد نمت من خلال علمي التحريك الكهربائي والضوء . وفي هذين الحقلين لم تغير النسبية التنبؤات النظرية ، ولكنها بسطت بنيتهما النظرية ، اي طريقة اشتقاق القوانين ، كما انها قد اختصرت (وهذا هو وجهها الاهم) الى حد كبير عدد الفرضيات المستقلة التي تشكل اساس هذين العلمين . فنظرية النسبية قد رفعت هذين العلمين الى درجة من المعقولية جعلت نظرية مكسويل - لورنتس مقبولة عموما لدى الفيزيائيين حتى ولو كانت الاحكام التجريبية لصالحها مشوبة ببعض الالتباس .

فالميكانيك التقليدي يجب ان يتعدل ، حتى ينسجم مع متطلبات نظرية النسبية ، قبل ان نتمكن من ادخاله في نطاقها . ان هذا التعديل لايتناول ، في قسمه الرئيسي ، سوى القوانين التي تخص السرعات العالية ، أي سرعات المادة v التي تقترب من سرعة النور c . ولدينا اليوم تجارب في هذا المجال الحركي تتناول الالكترونات فقط . اما من اجل الحركات البطيئة فان الفروق النسبوية من الميكانيك التقليدي تكون صغيرة لدرجة لايتاح الشعور بها . ونحن لن نفحص حركة النجوم قبل ان نأتي الى نظرية النسبية العامة . هذا وطبقا لنظرية النسبية لم تعد الطاقة الحركية للنقطة المادية التي تملك الكتلة m والسرعة v معطاة بالعبارة المعروفة التقليدية

$$\frac{m \frac{v^2}{2}}{mc^2} \quad \text{بل بالعبارة النسبوية} \quad \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

وقيمة هذه العبارة تصبح لامتناهية في الكبر عندما تقترب السرعة v من سرعة الضوء c . فالسرعة يجب اذن ان تظل اقل من c مهما بلغ عظم الطاقة التي نصرفها لتوليد التسارع . واذا نشرنا عبارة الطاقة الحركية النسبوية هذه على شكل سلسلة نحصل على :

$$mc^2 + m\frac{v^2}{2} + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \dots$$

فعندما يكون $\frac{v^2}{c^2}$ اصغر من واحد بكثير فان الحد الثالث من هذه السلسلة يصبح دوما صغيرا بالنسبة للحد الثاني الذي هو العبارة المعتمدة في الميكانيك التقليدي . لكن الحد الاول mc^2 لا يحوي السرعة ولا يجب اخذه بعين الاعتبار عندما تقتصر على معالجة موضوع كيفية تعلق طاقة النقطة المادية بالسرعة . وسنتكلم عن مفزاه الجوهرى فيما بعد .

ان اهم النتائج ذات الصبغة العامة والتي تقود اليها نظرية النسبية الخاصة هي النتيجة التي تخص مفهوم الكتلة . فقبل اكتشاف النسبية كانت الفيزياء تحوي قانوني انحفاظ منفصلين هامين واساسيين ، وهما قانون انحفاظ الطاقة وقانون انحفاظ الكتلة ، وكان كل من هذين القانونين الاساسيين يبدو مستقلا عن الآخر . بيد ان نظرية النسبية تجمعهما في قانون واحد . وسنشرح الآن باختصار كيف يتم هذا التوحيد وما هو المفزى الذي يجب ان يفهم منه .

ان مبدأ النسبية يتطلب ان يكون قانون انحفاظ الطاقة صحيحا ، لا بالنسبة لجملة الاحداثيات K فحسب بل وايضا وبالنسبة للجملة K' المتحركة بالنسبة لـ K حركة انسحابية منتظمة ، او باختصار ، بالنسبة لكل جملة احداثيات غاليلية . وتحويل لورنتس هو هنا العامل الحاسم في الانتقال من جملة احداثيات لآخرى .

ومن هذه المقدمات وباجراء محاكمات جد بسيطة نجد انفسنا مقودين الى النتيجة التالية المتصلة بمعادلات مكسويل الاساسية في التحريك الكهربائي :

ان الجسم المتحرك بالسرعة v والذي يمتص كمية E_0 (١) من الطاقة على شكل اشعاع ودون ان يعاني تغييرا في سرعته ، تزداد طاقته نتيجة لذلك بالمقدار

$$\frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

فاذا اخذنا بعين الاعتبار صيغة طاقة الجسم الحركية الواردة اعلاه فان طاقة الجسم المطلوبة تصبح عندئذ

$$\frac{(m + \frac{E_0}{c^2})c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

وهكذا نرى ان الجسم يمتلك طاقة كجسم متحرك بالسرعة v وكتلته $(m + \frac{E_0}{c^2})$.

وبذلك نستطيع ان نقول : اذا اكتسب جسم الطاقة E_0 فان كتلته العطالية تزداد بالكمية $\frac{E_0}{c^2}$ فالكتلة العطالية للجسم ليست مقدارا ثابتا ولكنها تتغير كما تتغير طاقة الجسم . اي ان الكتلة العطالية لمجموعة اجسام يمكن ان تعتبر قياسا لطاقتها . فقانون انحفاظ الكتلة يصبح عندئذ مطابقا لقانون انحفاظ الطاقة ، وهو لا يصح الا اذا لم تتبادل مجموعة الاجسام المعتبرة مع سواها اية طاقة ، لا عطاء ولا كسب . واذا كتبنا عبارة الطاقة على الشكل :

$$\frac{mc^2 + E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

نرى ان الحد mc^2 ، الذي لفت انتباهنا منذ قليل ، ليس شيئا آخر سوى الطاقة التي كان يمتلكها الجسم قبل ان يمتص الطاقة E_0 (٢) .

ان وضع هذه العلاقة على محك التجربة مباشرة ليس ممكنا في الوقت الحاضر (أي عام ١٩٢٠ ، اقرا الملاحظة في ذيل هذا الفصل) بسبب واقع ان

-
- (١) - ان E_0 هي الطاقة التي يمتصها الجسم المتحرك كما تبدو من الجملة المتحركة معه .
 (٢) - كما تقاس في جملة الاحداثيات المتحركة مع الجسم .

التغيرات التي تطرأ على الطاقة E_0 التي يملكها جسم ما ليست كبيرة لدرجة تكفي لكشف التغير الناشئ عنها على الكتلة العطالية للجسم . ف $\frac{E_0}{c^2}$ صغير جدا اذا قورن بالكتلة m التي كان يملكها الجسم قبل ان تطرأ عليه تلك التغيرات . وبسبب هذا الواقع امكن في الميكانيك التقليدي الاثبات التجريبي لاستقلالية قانون انحفاظ الكتلة .

دعوني الآن اصف ملاحظة اخيرة اساسية جدا ، ان نجاح تفسير مكسويل - فارادي FARADAY لانتقال الفعل الكهربيسي الى مسافات بعيدة كان ناجما عن قناعة الفيزيائيين بانه لا يوجد شيء يمكن ان نسميه انتقال الفعل آتيا (اي انتقالا لا يستلزم أي وسط بين الفاعل والمفعول به) على شاكلة قانون نيوتن في الثقائل . وفي نظرية النسبية ينتفي الفعل الآتي عن بعد ، اي انتقال التأثير بسرعة لامتناهية في الكبر ، ليحل محله انتقال الفعل بسرعة الضوء . وهذه النتيجة تتصل بواقع ان السرعة c تلعب دورا رئيسيا في هذه النظرية . وسنرى في القسم الثاني من هذا الكتاب كيف تتعدل هذه النتيجة في نظرية النسبية العامة .

ملاحظة : ان تقدم عمليات التحويل النووية ، الناجمة من رجم نوى الذرة بجسيمات الفا او بروتونات او بنوترونات او باشعة غاما ، قد اثبت التكافؤ بين الكتلة والطاقة كما تنص عليه المساواة $E = mc^2$. فمجموع الكتل المتفاعلة مضافا اليه المكافئ الكتلي لطاقة الجسم الراجم الحركية (او طاقة الفوتون غاما) هو دوما أصغر من مجموع الكتل الناجمة بعد التفاعل . وما الفرق بين هذين المجموعين سوى المكافئ الكتلي للطاقة الحركية التي تأخذها الجسيمات الناجمة في نهاية التفاعل (او الطاقة الكهربائية لفوتونات غاما) والسبب ذاته يكون مجموع كتل الذرات التي تعاني تفككا نوويا تلقائيا أكبر من مجموع كتل الذرات الناجمة من التفكك بفرق يكافئ مجموع الطاقات الحركية لشتى الجسيمات المتولدة من التفكك (او طاقة الفوتونات المتولدة) هذا وان عمليات قياس طاقات الاشعاع الصادر من التفاعلات النووية بالاضافة الى معادلات التفاعل ، قد مكنت من تقدير الكتل الذرية بدرجة عالية من الدقة . (المترجم الانكليزي) .



١٦ - التجربة ونظرية النسبية الخاصة

الى أي مدى تتفق نظرية النسبية مع التجربة ؟ لا يمكن بسهولة الاجابة عن هذا السؤال لاسباب ذكرناها فيما قبل بمناسبة تجربة فيزو الاساسية . فنظرية النسبية الخاصة تبلورت في ظل نظرية مكسويل - لورنتس في الظواهر الكهرطيسية . فكل واقع تجريبي يدعم النظرية الكهرطيسية يدعم أيضا نظرية النسبية . وكواقع ذي أهمية خاصة نذكر ان نظرية النسبية تمكننا من ان نتنبأ بالتأثيرات الواقعة على الضوء الواصل الينا من النجوم الثابتة . فهذه النتائج قد تم الحصول عليها بطريقة بسيطة جدا . أما التأثيرات المشار اليها ، والتي تنجم من حركة الارض بالنسبة للنجوم الثابتة ، فقد ظهرت على وفاق مع التجربة . ونقصد بذلك الحركة السنوية للمواضع الظاهرية للنجوم الثابتة والتي تنأى من حركة الارض حول الشمس (الزيج) ، كما نقصد تأثير المركبة الشعية لحركة النجوم هذه بالنسبة للارض على لون الضوء الواصل الينا من هذه النجوم . ان هذا التأثير الاخير يتجلى على شكل انزياح طفيف لخطوط طيف الضوء الواصل الينا من النجوم الثابتة عندما نقارن اوضاع هذه الخطوط بأوضاع الخطوط التي نحصل عليها من منبع ضوي ارضي (مفعول دوپلر DOPPLER) . ان الادلة التجريبية التي تؤيد نظرية مكسويل - لورنتس ، والتي هي في الوقت ذاته أدلة تؤيد نظرية النسبية ، هي أكثر عددا من ان تذكر هنا . انها في الواقع تحد الامكانيات النظرية الى مدى لم تتمكن أية نظرية سوى نظرية مكسويل - لورنتس من الوصول اليه عندما توضع على محك التجربة .

على ان ثمة صنفين من الوقائع التجريبية التي ظهرت حتى الآن يمكن ان تتمثل في نظرية مكسويل - لورنتس ولكن عن طريق ادخال فرضيات مساعدة،

هي بحد ذاتها - اي بدون استخدام نظرية النسبية - تبدو غريبة عن النظرية .

من المعلوم ان الاشعة المهبطية (الكاثودية) والاشعة المسماة باشعة بيتا الصادرة عن المواد المشعة تتألف من جسيمات مكهربة سلبيا (الكترونات) ذات عطالة صغيرة وسرعة كبيرة . فبدراسة انعطاف هذه الاشعة بتاثير الحقليين الكهربائي والمغناطيسي نستطيع ان ندرس قانون حركة هذه الجسيمات بدقة مضبوطة .

فبالمعالجة النظرية لهذه الالكترونات (١)، نواجه صعوبة ان النظرية الكهر حركية ليست بحد ذاتها قادرة على تفسير طبيعتها . فالشحنات الكهربائية التي من اشارة واحدة تتنافر فيما بينها ، وعلى هذا فالشحنات التي تحملها الالكترونات يجب ان تنحرف تحت تاثير تنافرها المتبادل ما لم تتدخل فيما بينها قوة من طبيعة اخرى ، وطبيعة هذه القوة مازال غامضة في نظرنا . فاذا سلمنا بأن المسافات بين الشحنات الكهربائية لا تتغير اثناء حركة الالكترونات (طبقا لما يقتضيه الميكانيك التقليدي) فسنصل الى قانون حركة للالكترونات لايتفق مع التجربة . لقد كان لورنتس ، مستهديا بوجهة نظر شكلية بحثة ، اول من ادخل فرضية ان شكل الالكترون يعاني تقلصا في منحى الحركة ناجما

عن الحركة ، وهذا التقلص متناسب مع $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. لكن هذه الفرضية، التي لا يوجد في علم التحريك الكهربائي مايسوغها ، زودتنا آنئذ بذلك القانون الحركي الخاص الذي ايدته التجربة مؤخرا بدقة عالية .

ان نظرية النسبية تقود الى قانون الحركة نفسه دون ان تتطلب اية فرضية خاصة حول بنية الالكترونات وسلوكها . ولقد وصلنا الى نتيجة مماثلة في الفصل ١٣ بخصوص تجربة فيزو ، تلك النتيجة التي ايدتها فيما بعد نظرية النسبية دون ضرورة لادخال اية فرضية فيما يخص طبيعة السائل .

(١) - ان نظرية النسبية العامة تشير بما يشبه الوضع الى ان شحنات الالكترونات تظل مترافقة معا بفضل قوى التناقل .

أما الصنف الثاني من الوقائع التجريبية التي ألمحنا اليها فيخص مسألة فيما اذا كانت حركة الارض في الفضاء يمكن ان تكشف بواسطة تجارب أرضية . وقد ذكرنا في الفصل (٥) ان كل المحاولات التي تمت في هذا الصدد قد باءت بالفشل .

وقد كان هذا الفشل غير قابل للتفسير قبل اكتشاف نظرية النسبية لأسباب نود الآن مناقشتها . فالآراء الموروثة مسبقا بخصوص المكان والزمان لم تكن تسمح بآثار أي شك بالاهمية الكبرى لتحويل غاليله لدى المرور من جسم مقارنة الى جسم مقارنة آخر . فاذا قبلنا الآن بأن معادلات مكسويل - لورنتس تصح في جملة مقارنة K ، نجد انها لاتصح في جملة مقارنة K' متحركة بانتظام بالنسبة لـ K ، عندما تعتمد تحويل غاليله للمرور من K الى K' . وهذا يعني انه ، من بين كل جمل الاحداثيات الغاليلية ، يوجد جملة واحدة ، ذات حالة حركية خاصة ، مقبولة فيزيائيا . وقد فسرت هذه النتيجة فيزيائيا على أساس ان الجملة K ساكنة بالنسبة لوسط افتراضي أطلق عليه اسم اثير الفضاء . وعلى هذا فكل جملة K' متحركة بالنسبة لـ K يجب ان تعتبر في حالة حركة بالنسبة للاثير . وقد عزي لحركة K' خلال الاثير (« ربح الاثير » (١) بالنسبة لـ K') قوانين شديدة التعقيد يفترض ان تصح بالنسبة لـ K' . وبصريح العبارة يجب ان تكون الكرة الأرضية ملفوحة بربح الاثير هذه وقد كرس الفيزيائيون جهودا كبيرة ووقتا طويلا لكشف وجود ربح أثيرية بالقرب من سطح الارض .

ومن بين المحاولات العديدة في هذا السبيل تخيل مايكلسن MICHELSON طريقة بدت أكثر الطرق ملائمة لحسم الموقف . لنتصور مرآتين مستويتين مثبتتين على جسم صلب بحيث يتقابل سطحاهما العاكسان . فاي شعاع ضوئي متحرك جيئة وذهابا بينهما سيستغرق زمنا محددا T في عملية ذهاب واياب واحدة بين المرآتين اذا كانت الجملة كلها ساكنة بالنسبة للاثير . أما اذا

(١) - تشبيها بـ « ربح الهواء » التي تطفح وجه الانسان الذي يركض في هواء ساكن .
(المترجم) .

كان الجسم الصلب والمرآتان تتحرك معا بالنسبة للآثير فان الحساب يدل ، في كل الاحوال ، على ان الشعاع يستغرق في العملية ذاتها زمنا T مختلفا قليلا عن T . ومن جهة اخرى ، يدل الحساب ايضا ، من اجل سرعة معينة v بالنسبة للآثير ، على ان هذا الزمن T يختلف عندما تكون حركة الجسم عمودية على مستوى المرآتين عنه عندما تكون هذه الحركة موازية لهما . ورغم ان الفرق بين قيمتي T هاتين صغير جدا فقد ركب مايكلسن ومورلي MORLEY بعناية تجربة تستغل ظاهرة التداخل الضوئي لكشف هذا الفرق بوضوح . لكن نتيجة التجربة كانت سلبية ، فأوقعت الفيزيائيين في حيرة وذهول . فهرع لورنتس وفيتزجيرالد FITZGERALD لانقاذ النظرية من هذا المأزق بافتراض ان حركة الجسم بالنسبة للآثير تؤدي الى تقلص طوله في منحى الحركة وبالمقدار الضروري بالضبط لتغطية ذلك الفرق الزمني . وبالمقارنة مع المناقشة الواردة في الفصل (١٢) نرى ان نظرية النسبية تقدم هذا الحل ذاته للخروج من ذلك المأزق . لكن طريقة التفسير المستندة الى نظرية النسبية اكثر ارضاء للفكر . فليس في هذه النظرية شيء يمكن ان يسمى جملة احداثيات «مفضلة لذاتها» (وحيدة) تتبع الفرصة لادخال فكرة الآثير ، ولا يمكن بالتالي ان توجد اية ريب اثيرية ولا ما يدعو لاختراع تجربة تثبت وجوده . فتقلص اطوال الاجسام المتحركة نابع هنا من مبداءي النظرية الاساسيين دون حاجة لادخال فرضيات خاصة . وكما برز لنا عامل التقلص هذا نجد هنا ، لا الحركة بحد ذاتها التي لانعلق بها اي معنى ، بل الحركة بالنسبة لجسم المقارنة المختار في الحالة الخاصة المستهدفة . فبالنسبة لجملة احداثيات تتحرك مع الارض لا تقصر المسافات بين المرايا في تجربة مايكلسن ومورلي ، بل هي تقصر في جملة احداثيات ساكنة بالنسبة للشمس .



١٧ - فضاء منكوفسكي ذو الأبعاد الأربعة

ان غير الرياضيين تعتريهم قشعريرة خفية عندما يسمعون كلاما عن أشياء « ذات أربعة أبعاد » ، وينتابهم شعور لا يختلف عن الشعور الذي يسببه التفكير في أشياء السحر . ومع ذلك فلا يوجد قول من الفضاء المألوف أصح من قولنا اننا نعيش في متصل مكاني - زماني ذي أربعة أبعاد .

ان الفضاء متصل ذي ثلاثة أبعاد . وهذا القول يعني امكانية توصيف وضع نقطة ما (ساكنة) بواسطة ثلاثة أعداد (احداثيات) x و y و z ، كما يعني أنه يوجد ، في جوار تلك النقطة ، عدد غير محدود من النقاط التي يمكن تحديد مواضعها باحداثيات x_1 و y_1 و z_1 ، يمكن ان تكون قريبة قدر ما نريد من قيم الاحداثيات x و y و z التي تحدد مكان النقطة الاولى . وبفضل هذه الخاصة الاخيرة نتكلم عن « المتصل » ، وبسبب وجود ثلاثة احداثيات نقول ان هذا المتصل « ثلاثي الأبعاد » .

ولاسباب مماثلة فان عالم الظواهر الفيزيائية الذي اسماه منكوفسكي باختصار « العالم » هو بالطبع « رباعي الأبعاد » بالمعنى المكاني - الزماني . لانه يتألف من حوادث فردية يتعين كل منها بأربعة أعداد . ثلاثة منها احداثيات مكانية x و y و z ، والرابع احداثي زماني هو قيمة الزمن t . فـ « العالم » بهذا المعنى هو متصل أيضا ، لانه يوجد لكل حادث عدد غير محدود من الحوادث « المجاورة » (التي وقعت أو على الاقل ممكنة الوقوع) التي يمكن تحديد مواضعها مكانيا - زمانيا بأربعة احداثيات x_1 و y_1 و z_1 و t_1 لا تختلف الا بكميات صغيرة عن الاحداثيات x و y و z و t التي تحدد مكان - زمان الحادث الاول . هذا وان عدم اعتيادنا على ادراك العالم بهذا المعنى ، كمتصل رباعي الأبعاد ، ناشيء عن واقع ان الزمن كان يلعب ، في

الفيزياء وقبل اكتشاف نظرية النسبية ، دورا مستقلا ومختلفا عن الدور الذي تلعبه الاحداثيات المكانية . ولهذا السبب تعودنا على معاملة الزمن كمتصل مستقل . وواقع الامر ان الزمن ، في عرف الميكانيك التقليدي ، كائن مطلق ، أي انه مستقل عن وجود جملة الاحداثيات وعن ظروف حركتها . وهذا ما تعبر عنه المعادلة الاخيرة من تحويل غاليله ($t' = t$) .

ان المحاكمة في « العالم » الرباعي الابعاد عملية طبيعية في نظرية النسبية . لان الزمن قد سلب استقلاله في هذه النظرية . وهذا واضح في المعادلة الرابعة لتحويل لورنتس

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

وفوق ذلك فان الفرق الزمني $\Delta t'$ بين حادثين ، بالنسبة لـ K' . وبموجب هذه المعادلة ، لاينعدم عموما ، حتى ولو انعدم الفارق الزمني Δt بين هذين الحادثين بالنسبة لـ K ف « المسافة - المكانية » البحتة في الجملة K بين الحادثين تصبح « مكانية - زمانية » بالنسبة للجملة K' . لكن اكتشاف منكوفسكي ، على اهميته في التطور الشكلي لنظرية النسبية ، لايمكن هنا . بل يجب بالاحرى البحث عنه في واقع انه يعترف ان المتصل المكاني - الزماني الرباعي الابعاد في نظرية النسبية ، في اكثر خواصه الشكلية اساسية ، يظهر علاقة بارزة بالمتصل الثلاثي الابعاد في فضاء الهندسة الاقليدية . ولكي نعطي هذه العلاقة ما يستحق من تقدير علينا ، في كل الاحوال ، ان نبدل الاحداثي الزمني المعروف (1) بمقدار تخيلي ، $\sqrt{-1} \cdot ct$ متناسب معه . وضمن هذه الشروط تكتسب القوانين الطبيعية التي تنسجم مع متطلبات نظرية النسبية (الخاصة) اشكالا رياضية يلعب فيها الاحداثي الزمني الدور نفسه الذي يلعبه في الفضاء الثلاثي الابعاد . فمن الناحية الشكلية ، تقابل هذه الاحداثيات الاربعة هنا احداثيات المكان الثلاثة في الهندسة الاقليدية . ومن الواضح حتما ، حتى لغير الرياضيين ، ان هذه الاضافة الشكلية البحتة الى معارفنا قد اكسبت النظرية وضوحا لا يقدر .

ان هذه الملاحظات المقتضية يمكن ان تعطي القارئ مجرد الملمع غامض عن
الفكرة الهامة التي أسهم بها منكوفسكي . فمن المحتمل ان نظرية النسبية
العامة ، التي سنشرح أفكارها الرئيسية في الصفحات القادمة ، لن تكتسب
بدون هذا الاسهام أكثر من ثوبها الفضفاض . ومما لاشك فيه ان أعمال
منكوفسكي عسيرة الإدراك على من ليس لديه خبرة في الرياضيات ، ولكن بما
أن فهم الأفكار الأساسية لنظريتي النسبية ، الخاصة والعامة ، لا يستلزم
الإحاطة التامة بهذه الأعمال فسنتركها الآن مؤقتا ولن نعود إليها الا في نهاية
القسم الثاني من هذا الكتاب .



القِسْمُ الثَّانِي

نظرية النسبية العامة

١٨ - مبدأ النسبية الخاص والعام

ان المبدأ الاساسي الذي تمحورت عليه محاكماتنا السابقة كان مبدأ النسبية الخاص ، اي مبدأ النسبية الفيزيائي الخاص بالحركة المنتظمة .
لنتفحص مرة أخرى مضمونه باتقان .

لقد كان واضحا دوما ، من خلال الفكرة التي توجهنا ، ان كل حركة يجب ان تعتبر حركة نسبية فقط . وبالعودة الى الايضاح التفسيري الذي كنا نستخدمه مرارا ، اي زيق السكة وعربة القطار ، يمكن ان نعبر هنا عن الواقع الراهن لهذه الحركة بالشكلين التاليين ، المتساويين في التبرير :

أ - ان العربة في حالة حركة بالنسبة للزيق .

ب - ان الزيق في حالة حركة بالنسبة للعربة .

ان العربة (في أ) والزيق (في ب) يخدمان كجسم مقارنة في كلامنا عن الحركة الراهنة . فاذا كانت المسألة مسألة كشف الحركة المستهدفة او توصيفها فلحسب ، فلا أهمية مبدئيا لتحديد جسم المقارنة الذي ننسب اليه الحركة . وهذا ، كما ذكرنا منذ قليل ، واضح من تلقاء ذاته ولكن يجب ان لانخلط بينه وبين ما يسمى « مبدأ النسبية » الذي هو اوسع شمولاً ، والذي اتخذناه كأساس في تحرياتنا .

ان المبدأ الذي استخدمناه لا يؤكد فقط ان لا فرق بين اختيار العربة وبين اختيار الزيق كجسم مقارنة في توصيف اي حادث (فهذا ايضا واضح من تلقاء ذاته) . لكن مبدأنا هذا يؤكد بالاحرى مايلي : اذا صفنا قوانين الطبيعة العامة، كما نحصل عليها من التجربة ، باستخدام :

أ - الزيق كجسم مقارنة .

ب - عربة القطار كجسم مقارنة .

فان القوانين العامة هذه (كقوانين الميكانيك وقانون انتشار الضوء في الخلاء) تأخذ الشكل نفسه في كلتا الحالتين . وهذا مايمكن التعبير عنه أيضا كما يلي : ان ايا من جسمي المقارنة K و K' لاينفرد بأية ميزة عن الآخر (قل « لا يتمتع بأفضلية خاصة ») لدى التوصيف الفيزيائي لمجريات الحوادث الطبيعية . ان هذه المقولة الاخيرة ، بخلاف الاولى ، ليست بالضرورة مقبولة سلفا ، انها غير محتواة في مفهومي « الحركة » و « جسم المقارنة » ولا يمكن استنباطها منهما ، لكن التجربة وحدها هي الكفيلة بتأكيد صحتها أو نفيها .

ونحن ، على كل حال ، لم نؤكد بتاتا حتى الآن تكافؤ جميع اجسام المقارنة K ازاء صياغة القوانين الطبيعية . فاهتمامنا كان ينصب على الامور التالية . انطلقنا ، قبل كل شيء من افتراض انه يوجد جسم مقارنة K تجعل ظروفه الحركية قانون غاليله صحيحا بالنسبة له : أي ان الجسم المتروك لشأنه والبعيد بعدا كافيا عن أي جسم آخر يتحرك بانتظام في خط مستقيم . فقوانين الطبيعة بالنسبة لـ K (جسم مقارنة غاليلي) لابد ان تكون أبسط مايمكن . لكن كل اجسام المقارنة K ،بالاضافة لـ K ، لابد ان تعطى الافضلية ذاتها ولا بد ان تكون مكافئة لـ K ازاء صياغة قوانين الطبيعة ، شرط ان تكون في حالة حركة مستقيمة غير دوارة بالنسبة لـ K . فكل اجسام المقارنة هذه يجب ان تعتبر اجسام مقارنة غاليلية . ولا تقوم صحة مبدأ النسبية الا من أجل اجسام المقارنة هذه لاسواها من الاجسام (التي تقوم بحركة من نوع آخر) . وبهذا المعنى نتكلم عن مبدأ النسبية الخاص ، او نظرية النسبية الخاصة .

وفي غير ذلك نرغب في فهم « مبدأ النسبية العام » على انه المقولة التالية: ان كل اجسام المقارنة K ، K^* الخ . . متكافئة في توصيف الظواهر الطبيعية (صياغة قوانين الطبيعة العامة) مهما كانت حالتها الحركية . ولكننا قبل ان نذهب الى أبعد من هذا نلفت النظر الى اننا سنستبدل بهذا النص فيما بعد صياغة أكثر تجريدا ، لاسباب ستتضح في مرحلة لاحقة .

هذا وبعد ان اتضحت ضرورة ادخال مبدأ النسبية الخاص ، فان الدهن الذي يسعى نحو التعميم لابد ان تستهويه المفامرة لتخطى ذلك الى مبدأ النسبية العام . لكن محاكمة بسيطة موثوقة في الظاهر تماما قد توحى ، في الوقت الحاضر على الاقل ، ان الامل ضعيف في النجاح في محاولة من هذا القبيل . لتصور اننا قد انتقلنا الى داخل صديقتنا القديمة ، عربة القطار التي تسافر بسرعة منتظمة . فالسافر لن يتحسس بحركتها طالما ظلت هذه الحركة منتظمة ، وذلك هو السبب الذي يبيح له ان يفسر واقع هذه الحال بأن العربة ساكنة وان الزيق هو الذي يتحرك . وهذا التفسير له مايسوغه تماما بموجب مبدأ النسبية الخاص ومن وجهة نظر فيزيائية . فاذا أصبحت الآن حركة العربة غير منتظمة ، كأن نلجمها بشدة بواسطة الكوابح فان القاطن في العربة سيعاني انقذافا نحو الامام . اي ان الحركة المتباطئة للأجسام (القطار) تتجلى في السلوك الميكانيكي للقاطنين في عربة القطار . فهذا السلوك يختلف عما كان عليه في الحالة السابقة ، وعلى هذا يبدو من المستحيل ان تنطبق قوانين الميكانيك داخل العربة ذات الحركة اللامنتظمة كما كانت تنطبق على العربة الساكنة او المتحركة بانتظام . فمن الواضح، في كل حادث، ان قانون غاليله غير صحيح بالنسبة للعربة ذات الحركة اللامنتظمة . وبسبب هذا الواقع نجد انفسنا مضطرين لان نعتبر الحركة اللامنتظمة نوعا من الحقيقة الفيزيائية المطلقة لدى مواجهة مبدأ النسبية العام . لكننا سنرى قريبا فيما يلي ان هذه النتيجة لايمكن الاحتفاظ بها .



١٩ - عقل التناقض

« عندما نلتقط حجرا ثم نتركه لشأنه ، لماذا يسقط نحو الارض ؟ ان الجواب المؤلف عن هذا السؤال هو : « لان الارض تجذبه » . لكن الفيزياء الحديثة تصوغ الجواب بشكل مختلف نوعا ما ، للسبب التالي . لقد تعودنا ، كنتيجة للدراسة الظواهر الكهربائية بامعان ، على ان نعتبر الفعل عن بعد عملية مستحيلة دون تدخل وسط ما يصل الفاعل بالمفعول به . ففي ظاهرة جذب المغناطيس لقطعة الحديد ، مثلا ، لا يمكننا ان نرضى بتفسير هذه الظاهرة على اساس ان المغناطيس يؤثر مباشرة على الحديد عبر الفضاء الخالي بينهما ، لكننا مضطرون - على طريقة فارادي - الى ان نتصور ان المغناطيس يخلق ، في الفضاء المحيط به ، شيئا فيزيائيا حقيقيا ، وهذا الشيء هو ما نسميه « حقلًا مغناطيسيا » . وهذا الحقل يؤثر بدوره على قطعة الحديد ، مما يجعلها تسعى للتحرك نحو المغناطيس . ونحن لن نناقش هنا تبرير هذا المفهوم الطارئ الذي هو في حقيقة الامر ، اعتباطي نوعا ما . ولكننا نكتفي بالإشارة الى ان الظواهر الكهربائية يمكن ان تتمثل بشكل أفضل بواسطة منها بدونه . وهذا القول ينطبق خصوصا على انتقال الامواج الكهربائية . وينظر أيضا الى افعال التناقض بنظرة معاملة .

ان فعل الارض بالحجر يتولد بأسلوب لامباشر . فالارض تخلق حولها حقلًا ثقاليًا يفعل في الحجر ويسبب حركة سقوطه . وشدة هذا الفعل على الجسم ، كما نعلم من التجربة ، تتناقض وفق قانون معين تماما عندما يكون الحجر أكثر فأكثر بعدا عن الارض وهذا يعني ، في وجهة نظرنا ، ان القانون الذي يتحكم في خواص الحقل المكانية لابد ان يكون قانونا معينًا تماما كي يمثل ،

تمثيلا صحيحا : تناقص فعل التثاقل لدى ازدياد البعد عن الاجسام الفاعلة .
انه شيء كهذا :

ان الجسم (الارض مثلا) يولد مباشرة حقلا في جواره القريب ، ان شدة هذا الحقل ومنحاه ، في نقاط بعيدة عن الجسم الفاعل ، تتعينان بالقانون الذي يتحكم في الصفات المكانية لحقول التثاقل نفسها هناك .

هذا وان ما يميز الحقل التثاقلي عن الحقلين ، الكهربائي والمغناطيسي ، هو ان حقل التثاقل يتمتع بخاصية مميزة ذات اهمية اساسية فيما سنقوله عنه . وهذه الخاصية هي :

ان الاجسام المتحركة بفعل حقل التثاقل وحده تكتسب تسارعا لا يتعلق بتاتا بنوع مادة الجسم ولا بحالته الفيزيائية . قطعة من الرصاص ، مثلا ، وقطعة من الخشب تهبطان بأسلوب واحد تماما في حقل تثاقلي (في الغلاء) عندما تنطلقان ، معا ، من حالة السكون او بسرعة بدئية واحدة . ان هذا القانون ، المحقق بدقة عالية ، يمكن التعبير عنه بشكل آخر في ضوء الاعتبارات التالية .

لدينا ، بموجب قانون نيوتن في الحركة

$$(\text{ القوة }) = (\text{ الكتلة العطالية }) \times (\text{ التسارع })$$

حيث « الكتلة العطالية » ثابت مميز للجسم المتسارع . واذا كان التثاقل مسبب هذه الحركة نحصل على

$$(\text{ القوة }) = (\text{ الكتلة الثقالية }) \times (\text{ شدة الحقل التثاقلي })$$

حيث « الكتلة الثقالية » هي ايضا ثابت مميز للجسم . ومن هاتين المعادلتين ينتج :

$$(\text{ التسارع }) = \frac{ (\text{ الكتلة الثقالية }) }{ (\text{ الكتلة العطالية }) } \times (\text{ شدة الحقل التثاقلي })$$

والآن ، اذا كان التسارع ، بموجب ما يستدل من التجربة ، مستقلا عن طبيعة الجسم وعن حالته الفيزيائية وواحدا في حقل ثقالي معين فان حاصل قسمة الكتلة الثقالية على الكتلة العطالية لابد ان يكون واحدا من اجل أي جسم . فاذا احسنا اختيار وحدات قياس لهاتين الكتلتين تجعل حاصل القسمة هذا مساويا الرقم ١ . (واحد) نحصل على القانون التالي : ان كتلة الجسم الثقالية تساوي كتلته العطالية .

ان هذا القانون الهام مؤكد ، حتى اليوم ، في علم الميكانيك ، لكنه مازال يفتقر الى التفسير . بيد اننا لايمكن ان نحصل على تفسير مرض الا اذا اعترفنا بالحقيقة التالية : ان خاصية الجسم التي تتجلى تارة كـ « عطالة » هي نفس الخاصية التي تتجلى كـ « وزن » (او كـ « ثقل ») تارة أخرى . وسنرى في الفصل القادم الى أي مدى تصح هذه المقولة وكيف ترتبط هذه المسألة بمسألة النسبية العامة .



٢٠ التساوي بين الكتلة العطالية والكتلة النقالية كدليل على سُلم النسبية العامة

نتصور حيزا كبيرا من الفضاء الخالي بعيدا ، عن اي نجم وعن اية كتلة مادية ، لدرجة أننا يمكن ان نعتبر انفسنا تقريبا في الظروف التي يتطلبها قانون غاليليه الاساسي . يمكننا عندئذ ان نختار جسم مقارنة غاليلي لهذا الحيز من الفضاء (من العالم) تبقى النقاط الساكنة بالنسبة اليه ساكنة والنقاط المتحركة مستمرة دوما في حركة مستقيمة منتظمة . لتصور ، كجسم مقارنة ، صندوقا كبيرا يشبه غرفة وفي داخله راصد مع أجهزة قياس . لا يوجد طبعا ثاقل بالنسبة لهذا الراصد ، ويجب عليه ان يثبت نفسه على الارض بالجبال ، والا فان أضعف صدمة على أرض الصندوق تجعل الراصد يرتفع ببطء نحو سقف الصندوق .

هذا ويوجد في وسط السطح الخارجي للسقف كلاب مربوط به حبل . لنفترض ان « كائنا » (ان نوع هذا الكائن لايهمنا) يبدأ بشد الحبل بقوة ثابتة ، ويبدأ الصندوق مع الراصد بالحركة « نحو الاعلى » متسارعا بانتظام . وبمرور الزمن ستبلغ السرعة قيما مذهلة ، عندما ننظر الى الصندوق من جسم مقارنة آخر لايجره الحبل .

لكن كيف يشعر الراصد في الصندوق بهذه العملية ؟ ان تسارع الصندوق سينتقل اليه بفضل رد فعل أرض الصندوق ، وعليه عندئذ ان يتحمل هذا الضغط بساقيه اذا شاء ان يتجنب الانهيار نحو أرض الصندوق . فهو اذن في حال مماثلة تماما لحال أي انسان في غرفة منزل قائم على سطح الارض . فلو ترك لشأنه جسما حرا كان يمسكه بيده ، فان تسارع الصندوق لن ينتقل

الى هذا الجسم ، مما يجعل هذا الجسم يقترب من قعر الصندوق بحركة نسبية متسارعة . وعندئذ سيتأكد الراصد ان تسارع الجسم نحو ارض الصندوق ثابت على قيمة واحدة مهما كان نوع الجسم الذي يستعمله في هذه التجربة .

هذا واذا قارن الراصد نتيجة هذه التجربة بما يعرفه عن حقل الثقالة (كما شرحناه في الفصل السابق) فسيصل الرجل الى الاعتقاد بان حقلًا ثقاليًا ، ثابت الشدة بمرور الزمن ، يسود في الصندوق . هذا ولا شك انه سيختار في بادئ الامر في تحليل ان الصندوق لا يهبط في الحقل الثقالي هذا . لكنه ، على كل حال ، سيكتشف الكلاب في وسط السقف والحبل المربوط به ، وسيصل في نهاية الامر الى نتيجة ان الصندوق معلق ساكنًا في حقل ثقالي . هل يحق لنا ان نهزأ من الرجل وان نقول انه قد اخطأ في استنتاجه ؟ انني لا اعتقد انه يحق لنا ذلك اذا اردنا ان نكون منصفين ، بل ان من الحري بنا ان نقبل ان طريقته في تحليل الموقف لاتتناقض مع العقل ولا مع قوانين الميكانيك المعروفة . فبالرغم من ان الصندوق في حالة تسارع بالنسبة لـ « الفضاء الفاليلي » المعتمد في البدء ، نستطيع ان نعتبره في حالة سكون ، وبذلك نحصل على أساس لتوسيع دائرة مبدأ النسبية حتى يضم اجسام المقارنة المتسارعة بعضًا بالنسبة لبعض ، ونتيجة لذلك نكتسب دليلًا قويًا على مسلبة نسبية شاملة .

هذا ويجب ان نلاحظ بعناية ان امكانية هذه الطريقة في التفسير تعتمد على الخاصة الأساسية للحقل الثقالي التي تمنح كل الاجسام تسارعًا واحدًا أو ، وهذا يعود الى ذاك ، على قانون التساوي بين الكتلة العطالية والكتلة الثقالية . فلولا وجود هذا القانون الطبيعي لما تمكن الرجل في الصندوق المتسارع من تفسير سلوك الاجسام حوله على أساس افتراض حقل ثقالي ولما كان له الحق ، بالاعتماد على تجربته ، في ان يفترض جسم مقارنته في « حالة سكون » .

نفترض ان الرجل في الصندوق قد علق حبلًا في السقف الداخلي وانه

علق جسما في طرفه السائب. ونتيجة لذلك سيتوتر الحبل بحيث يبقى متديا « شاقوليا » نحو الاسفل . فاذا طلبنا رأي الرجل في سبب هذا التوتر سيجيب : « ان الجسم المعلق بالحبل يعاني قوة شد نحو الاسفل في الحقل الثقالي ، وهذه القوة تتعادل مع توتر الحبل ، ان ما يحدد قيمة توتر الحبل هي **الكتلة الثقالية للجسم المعلق** » . ولو سألنا راصدا موجودا في الفضاء الحر خارج الصندوق عن رايه في الموضوع لاجاب : « ان الحبل يجب بالضرورة ان يساهم في حركة الصندوق المتسارعة وان ينقل هذه الحركة الى الجسم المعلق به ، فتوتر الحبل يكفي بالضبط لاعطاء الجسم هذا التسارع . وان ما يحدد قيمة توتر الحبل هي **الكتلة العطالية للجسم المعلق** . » واستدللا بهذا المثال نرى ان توسيع مجال مبدأ النسبية يتضمن **بالضرورة** قانون تساوي الكتلة العطالية والكتلة الثقالية . وبذلك نكون قد حصلنا على تفسير فيزيائي لهذا القانون .

ومن هذه المحاكمة في شأن الصندوق المتسارع ندرك ان نظرية النسبية العامة لابد ان تعطي نتائج هامة بخصوص قوانين الثقائل . وواقع الامر ان الملاحظة المنهجية لفكرة النسبية العامة قد قادت الى القوانين التي تحكم الحقل الثقالي . وعلى كل حال وقبل ان نذهب الى ابعد من ذلك ، يجب ان احذر القارئ من فهم خاطيء قد توحى به هذه المحاكمت . فالحقل الثقالي موجود لدى الرجل في الصندوق بالرغم من واقع انه لم يكن يوجد حقل من هذا القبيل في جملة الاحداثيات المختارة أولا ، والآن نستطيع بسهولة ان نفترض ان وجود الحقل الثقالي ليس سوى وجود ظاهري . كما يمكن ان نفكر ، بصرف النظر عن نوع الحقل الثقالي الذي سيظهر ، اننا نستطيع دوما ان نختار جسم مقارنة آخر لا يوجد حقل ثقالي بالنسبة له . ان هذا القول لا ينسحب بتاتا على أي حقل ثقالي بل وحصرنا على حقول ذات شكل خاص معين . فمن المستحيل مثلا ايجاد جسم مقارنة يتلاشى بالنسبة له حقل الثقائل الارضي (بمجمله كله) .

هذا ويمكن الآن ان نحلل الدليل الذي سقناه في نهاية الفصل ١٨ ضد

نظرية النسبية العامة كي نعلم لماذا لم يكن مقنعا . فمن الصحيح المؤكد ان القاطن في عربة القطار يعاني اندفاعا نحو الامام نتيجة لجم الحركة بالكوابح ، وبذلك يشعر بعدم انتظام (بتباطؤ) حركة العربة . ولكن لا أحد يجبره على عزو هذا الاندفاع الى تسارع (تباطؤ) « حقيقي » للعربة . اذ يستطيع ايضا ان يفسر ذلك كما يلي : « ان الجسم الذي اتخذه جسم بمقارنة (العربة) مائال في حالة سكون . ولكن يوجد (اثناء فترة كبح الحركة) بالنسبة له حقل ثقالي نحو الامام متغير بمرور الزمن . وبتأثير هذا الحقل يتحرك الزيق مع الارض حركة لمنتظمة بحيث تجعل السرعة البدئية المتجهة الى الورااء تتضاءل باستمرار » .



٢١- ما هو السبب الذي يجعل أسس الميكانيك التقليدي ونظرته للنسبية الخاصة غير مرضية

لقد ذكرنا مرارا ان الميكانيك التقليدي ينطلق من القانون التالي : ان
الجسيمات المادية البعيدة بعدا كافيا عن اية جسيمات مادية تستمر متحركة
بانتظام في خط مستقيم او تظل في حالة سكون . ولقد احصنا مرارا على ان
هذا القانون الاساسي لا يصح الا من اجل اجسام مقارنة (K) تتمتع بحالات
حركية خاصة وتتحرك ، بعضا بالنسبة لبعض ، حركة انسحابية منتظمة .
اما بالنسبة لأجسام مقارنة اخرى (K') فالقانون غير صحيح . فنحن اذن
نفرق ، سواء في الميكانيك التقليدي او في نظرية النسبية الخاصة ، بين اجسام
مقارنة K نستطيع ان نقول ان « قوانين الطبيعة » المعترف بها صحيحة
بالنسبة لها ، وبين اجسام مقارنة لا تصح هذه القوانين بالنسبة لها .

لكن ما من احد ذي تفكير منطقي يستطيع ان يرضى بهذا الامر . فهو
يسال : « كيف يعقل ان تتمتع بعض اجسام المقارنة (او ظروفها الحركية)
بافضلية على سواها من اجسام المقارنة (او ظروفها الحركية) ؟ ما هو سبب
هذه الافضلية ؟ » ولكي نشرح بوضوح ما يعني هذا السؤال نستخدم التشبيه
التالي :

اقف امام موقدي غاز متجاورين ، وعلى كل موقد وعاء معدني يمائل
الآخر لدرجة اننا يمكن ان نخلط بينهما . وكل وعاء مملوء بالماء حتى نصفه .
الاحظ ان الوعاء الاول يصدر بخارا باستمرار ، دون ان يصدر شيء عن
الثاني . فاندعش لذلك ، لانني لم ار قط موقدا ولا وعاء . لكنني لاحظت
بعدئذ ان شيئا مضيئا ازرق اللون موجود تحت الوعاء الاول ، فتزول دهشتي ،

ولو لم اكن قد رأيت لهب غاز من قبل . لانني استطيع عندئذ ان اقول ان الشيء الازرق هو الذي يتسبب في صدور البخار ، او ، على الاقل ، **لقد** يكون هو السبب . لكنني لو كنت لم لاحظ الشيء الازرق تحت اي من الوعائين ، وكان البخار يخرج من احد الوعائين دون الآخر ، فسابقى على دهشتي وحيرتي حتى اكتشف شيئا اعزو اليه اختلاف تصرف احد الوعائين عن تصرف الآخر .

وتشبيها بذلك ، أبحث دون جدوى عن شيء حقيقي في الميكانيك التقليدي (او في نظرية النسبية الخاصة) استطيع ان اعزو اليه اختلاف سلوك الاجسام منسوبا الى جملة المقارنة (K) من سلوكها منسوبا الى (K') (١) . لقد شعر نيوتن بهذا الاعتراض وحاول ان يفنده ، لكنه اخفق . لكن ا. ماخ (**EL. MACH**) كان اول من ادركه بوضوح ، وبسبب هذا الاعتراض صرح بأن علم الميكانيك يجب ان يعاد بناؤه على أسس جديدة . ان هذا الاعتراض لا يمكن الخلاص منه الا بفيزياء تنسجم مع مبدأ النسبية العام ، لان معادلات مثل هذه النظرية تصلح في اي جسم مقارنة مهما كانت حالته الحركية .



(١) - ان هذا الاعتراض تبرز اهميته عندما تكون الحالة الحركية للجسم المقارنة ذات طبيعة لا تحتاج لاي وسيط خارجي يسمح باستمرارها ، كحالة كون جسم المقارنة دوارا بانتظام .

٢٢ - بعض الاستنتاجات من مبدأ النسبية العام

ان المحاكمة التي سقناها في الفصل ٢٠ تظهر ان مبدأ النسبية العام يتيح لنا ان نجد خواص الحقل التثاقلي بأسلوب نظري بحت . لنفترض مثلاً اننا نعرف « السير » المكاني - الزماني لكل عملية طبيعية مهما كانت ، اي الاسلوب الذي تتخذه في المجال الغاليلي بالنسبة لجسم مقارنة غاليلي (K) . فبواسطة اجراءات نظرية بحتة (بالحساب مثلاً) نستطيع ان نجد كيف تظهر هذه العملية الطبيعية المعروفة ، من جسم مقارنة (K) متسارع بالنسبة لـ (K) ولكن ، بما انه يوجد حقل تثاقلي بالنسبة لجسم المقارنة الجديد هذا (K') ، فان محاكمتنا تعلمنا ايضاً كيف يؤثر الحقل التثاقلي في العملية المدروسة .

فنحن نعلم مثلاً ان الجسم المتحرك ، بالنسبة (K) ، حركة مستقيمة منتظمة (طبقاً لقانون غاليله) يقوم بحركة متسارعة ، ومنحنية عموماً ، بالنسبة لجسم المقارنة المتسارع (K') (الصندوق) . وهذا التسارع ، او الانحناء ، الذي يعانيه الجسم المتحرك ناجم عن الحقل التثاقلي السائد في الجملة K . لكن من المعلوم ان الحقل التثاقلي يؤثر في حركة الاجسام بهذه الطريقة ، مما يجعل محاكمتنا غير ذات فائدة اساسية جديدة .

لكننا نحصل على نتيجة اساسية جديدة عندما نقوم بمحاكمة مماثلة على شعاع ضوئي . فبالنسبة لجسم مقارنة غاليلي (K) ، ينتقل هذا الشعاع في خط مستقيم بالسرعة (C) . ويمكن ان نبرهن بسهولة على ان مسار الشعاع نفسه لا يظهر مستقيماً عندما ننظر اليه من الصندوق

المتسارع (جسم المقارنة K) . ومن ذلك نستنتج ان الشعاع الضوئي ينتشر عموماً وفق خط منحن في حقل ثقالي . وهذه النتيجة هامة من جهتين .

فمن جهة أولى ، يمكن ان نضعها على محك الواقع . فبرغم ان الفحص المفصل لهذه المسألة يظهر ان انحناء الاشعة الضوئية الذي تنبأ به نظرية النسبية العامة مفرط في الصغر في الحقول الثقالية المتاحة لنا عملياً ، الا انه يقدر بـ ١٧ ثانية قوسية من اجل اشعة ضوئية ترد الينا ماسة لحافة الشمس . وهذا الانحناء يمكن كشفه بالطريقة التالية : يوجد في السماء نجوم ثابتة تبدو من الارض قريبة جداً من الشمس ، مما يمكننا من رصدها أثناء كسوف كلي للشمس . ففي هذه المناسبة يجب ان تظهر مواقع هذه النجوم منحرفة بعيداً عن الشمس بالمقدار المذكور آنفاً ، وذلك عن مواقعها عندما تكون الشمس في موضع آخر من السماء . ان التحقق من صحة او عدم صحة هذا الاستنتاج مسألة من الاهمية بمكان ، نتوقع من الفلكيين ان يحسموها في اقرب وقت (١) .

ومن وجهة ثانية ، تدل نتائجنا ، بموجب نظرية النسبية العامة ، ان قانون ثبات سرعة الضوء في الخلاء ، وهو احد افتراضينا الاساسيين في نظرية النسبية الخاصة والذي استندنا عليه مراراً ، لن يعود ذا صلاحية عامة . فانحناء الشعاع الضوئي لا يمكن ان يحدث الا اذا تغيرت سرعة انتشار الضوء بتغير الموضع . وعلى هذا الاساس قد نظن ان نظرية النسبية الخاصة ومعها نظرية النسبية برمتها يجب ان تلقى في سلة المهملات . لكن حقيقة الامر ليست كذلك . فكل ما يمكن ان نستخلصه هو ان نظرية النسبية الخاصة لا يمكن ان تدعي لنفسها صلاحية عامة . أي ان نتائجها لاتصح الا اذا استطعنا ان نضرب صحفاً عن تأثير الحقول الثقالية على الظاهرة (اي على الضوء) .

(١) - ان وجود هذا الانحراف الذي تنبأت به النظرية قد تأكد لأول مرة في الصور التي التقطتها اللجنة المشتركة للجمعية الملكية وللجمعية الفلكية الملكية وذلك أثناء كسوف ٢٩ أيار ١٩١٩ (انظر الملحق ٣) .

وبما ان معارضي نظرية النسبية يصرون على ان نظرية النسبية العامة قد نبذت نظرية النسبية الخاصة فقد يكون من المفيد ان نوضح واقع هذا الامر بتشبيه ملائم . فقبل تقدم علم التحريك الكهربائي كانت قوانين الكهرباء الراكدة تبدو انها هي قوانين الكهرباء . لكننا نعلم اليوم ان الحقول الكهربائية لا يمكن ان تستخلص بدقة من محاكمات كهربائية راکدة الا في حالة يتعذر تحقيقها بالضبط ، وهي عندما تكون الشحنات الكهربائية ساكنة بعضا بالنسبة لبعض وبالنسبة لجملة الاحداثيات . فهل يسوغ لنا هذا السبب ان نقول ان معادلات مكسويل الحقلية في علم التحريك الكهربائي قد نبذت علم الكهرباء الراكدة ؟ كلا وبثباتنا . فعلم الكهرباء الراكدة ينضوي في علم التحريك الكهربائي كحالة حدية ، فقوانين هذا تعود الى قوانين ذاك عندما تصبح الحقول غير متغيرة بمرور الزمن . وما من مثير يمكن ان تؤول اليه نظرية فيزيائية احسن من مصير تبرز فيه كتمهيد لنظرية اوسع ادراكا وكحالة حدية لنظرية اعظم شمولاً .

وفي المثال الذي عالجناه بخصوص انتشار الضوء ، رأينا ان نظرية النسبية العامة تتيح لنا ان نستق نظريا تأثير الحقل الثقالي على سير الحوادث الطبيعية التي عرفنا قوانينها في حالة غياب الحقل الثقالي . لكن اجمل ما في نظرية النسبية العامة هو انها قدمت مفتاح الحل في مجال التحري عن القوانين التي تحكم حقل الثقائل نفسه . فلنلق الآن نظرة اولية على ذلك .

لقد تعرفنا على المجالات المكانية - الزمانية التي تتصرف (تقريبا) تصرفا « غاليليا » لدى اختيار جيد لجسم المقارنة ، اي في المجالات الخالية من الحقل الثقالي فاذا نسبنا الآن هذا المجال الى جسم مقارنة (K) يتمتع بحركة غير منتظمة ، فاننا سنجد بالنسبة لـ (K) حقلًا ثقاليًا متغيرًا في المكان وفي الزمان (١) . ان صفات هذا الحقل ستتعلق طبعًا بحركة (K) . فقانون الثقائل العام يجب ، وفقا لنظرية النسبية العامة ، ان يكون صحيحا في اي حقل

(١) ان هذا ينتج من تعميم المناقشة الواردة في الفصل ٢ .

تثاقلي نحصل عليه بهذه الطريقة . هذا ورغم اننا لا نستطيع ان نولد بهذه الطريقة كل انواع الحقول التثاقلية الا اننا لا يمكن ان نحفظ بالامل في ان نستنبط قانون التثاقل العام من حقول تثاقلية من نوع خاص . وهذا الامل قد تحقق بأحدى صورته . لكن بين الرؤية الواضحة للهدف وبين بلوغه كان لا بد من تدليل عقبة كأداة ، وبما ان هذا الامر متوغل الى اعماق الاشياء ، فلن اجروا على حجبته من القارئ . وهذا يستلزم ان نوسع نظرتنا الى المتصل المكاني - الزماني الى ابعد مما وصلنا اليه حتى الآن .



٢٣- سلوك المقاييس وقضبان القياس المربوطة بجسم مقارنته دوار

لقد اجمعت عمدا حتى الآن عن الحديث عن التفسير المكاني - الزماني للمعطيات في حالة نظرية النسبية العامة . وعلى هذا فانا ملذب ببعض الاهمال في معالجة امر يتكشف ، كما نعلم من نظرية النسبية الخاصة ، عن درجة عالية من الاهمية ، وهو ذنب لا يفتقر . وتدارك هذا النقص اصبح الآن شيئا ملحا . لكنني اود ان انبه منذ الآن ان هذا الموضوع يتطلب من القارئ صبرا غير قليل وقدرة كبيرة على التجريد .

ننتقل مرة اخرى من حالة خاصة جدا كنا قد استخدمناها مرارا . لنأمل في مجال مكاني - زماني لا يوجد فيه حقل ثقالي بالنسبة لجسم مقارنة (K) احسن اختيار حالته الحركية . ف K هو عندئذ جسم مقارنة غاليلي بخصوص المجال المعتبر ، وتصح فيه بالتالي النتائج المستخلصة من نظرية النسبية الخاصة . لنفترض ايضا اننا ننسب هذا المجال الى جسم مقارنة ثان (K') دوار بانتظام بالنسبة لـ (K) . ولتركيز الانتباه نتخيل ان (K') له شكل قرص مستدير مستو يدور بانتظام في مستويه الخاص وحول مركزه . فالراصد الموجود في مركز القرص (K') تتسلط عليه قوة تسعى الى قذفه خارج القرص في اتجاه قطري ، وتفسر على انها مفعول عطالي (قوة نابذة) في رأي راصد ساكن بالنسبة لجسم المقارنة الاول (K) ، لكن الراصد الموجود على القرص يستطيع ان يعتبر قرصه جسم مقارنة « ساكن » ، وله في مبدأ النسبية العام ما يسوغ ذلك . فالقوة المتسلطة عليه ، وفي الواقع على اي جسم ساكن بالنسبة للقرص ، يشعر بها وكأنها فعل

حقل تشاقلي . بيد ان التوزيع المكاني لهذا الحقل ليس من نوع الحقل الممكن وجوده في نظرية نيوتن في التثاقل (١) . ولكن بما ان الراصد يعتقد بنظرية النسبية العامة فان ذلك لا يقلقه ، وهو على حق عندما يعتقد بإمكانية صوغ قانون للتثاقل - قانون لا يتيح تفسير حركة النجوم بدقة فحسب بل ويفسر ايضا حقل القوة الذي يعانيه .

هذا ويبدأ الراصد بتنويع تجربته فوق قرصه المستدير على الميقاتيات وقضبان القياس . وهو يهدف من وراء ذلك الى التوصل لتعاريف مضبوطة لمعنى المعطيات المكانية - الزمانية بالنسبة للقرص الدوار (K) ، لتعاريف تستند على نتائج ارساده الخاصة . فماذا سيجد في مهمته هذه ؟

يبدأ بوضع احدي الميقاتيتين المتماثلتي التركيب في مركز القرص وبحيث تكونان ساكنتين بالنسبة له . والان نتساءل عما اذا كان سير الميقاتيتين واحدا بالنسبة لانسان موجود في جسم المقارنة الغالييلي غير الدوار (K) . ان الميقاتية الموجودة في مركز القرص تبدو ساكنة من (K) ، بينما تبدو الميقاتية الموجودة عند حافة القرص متحركة من (K) بسبب الدوران . وبموجب ما سبق ذكره في الفصل ١٢ - ينتج ان ميقاتية الحافة تقصر باستمرار عن ميقاتية المركز ، عندما ينظر اليهما من (K) . ومن الواضح ان المفعول نفسه هذا يراه انسان موجود مع ميقاتيته في مركز القرص . فعلى قرصنا الدوار اذن ، او في اي حقل تشاقلي عموما ، تبدو الميقاتية مقصرة او مسبقة بحسب المكان الذي وضعت فيه (ساكنة) ، ولهذا السبب لا يمكن ان نحصل للزمن على تعريف معقول بواسطة ميقاتيات نتدبر امر سكونها بالنسبة لجسم المقارنة . وثمة صعوبة مشابهة تبرز عندما نحاول تطبيق تعريف التزامن في مثل هذه الحالة ، لكنني لا اريد الذهاب الى ابعد من ذلك في هذه المسألة .

هذا ونصادف صعوبات هنا لا يمكن تخطيها ، بخصوص ايجاد تعاريف للأحداثيات المكانية . فاذا وضع الراصد قضيب قياسه العياري (الذي

(١) - ان هذا الحقل ينعدم في مركز القرص وتزايد شدته كلما زاد البعد عن المركز متناسبة مع هذا البعد .

نفترضه اقصر بكثير من نصف قطر القرص (على حافة القرص ، فان القضيب يبدو ، من الجملة الغاليلية ، ذا طول اصغر من ١ ، لانه يعاني ، بموجب ما جاء في الفصل ١٢ ، تقاصرا في منحى الحركة . بينما لا يعاني قضيب القياس ، كما يبدو من (K) ، اي تقاصر عندما يوضع على طول نصف القطر . وعلى هذا ، اذا قاس الراصد اولا محيط القرص بقضيب قياسه ثم قاس قطره ، وقسم اولهما على الثاني فلن يجد العدد المعروف $\pi = 3,14$ ، بل سيجد عددا اكبر منه (١) ، لكنه كان سيجد هذا العدد π بالضبط لو كان القرص ساكنا في K . وهذا يثبت ان مقولات الهندسة الاقليدية لا تصح تماما على القرص اللوار ، ولا في اي حقل ثنائي عموما ، وذلك ، على الاقل ، اذا استمررنا في اعطاء القيمة ١ الى طول القضيب مهما كان مكانه وفي اي اتجاه كان . وهكذا فان فكرة الخط المستقيم تفقد ايضا معناها . وبذلك لا نعود قادرين على اعطاء تعريف متماسك للاحداثيات (x , y , z) بالنسبة للقرص وبالطريقة التي ناقشناها في النظرية الخاصة ، ومادمننا لا نستطيع اعطاء تعريف لمكان الحوادث وزمانها ، فلن نستطيع ايجاد معنى دقيق للقوانين الطبيعية التي تتناول هذه الحوادث .

وهكذا فان كل استنتاجاتنا المبنية على النسبية العامة تنطرح على بساط البحث . وعلينا ، في الحقيقة ، ان نسلك منعطفا حرجا كي نستطيع تطبيق مسئلة النسبية العامة دون اي خطأ . وسأهمد الطريق للقارئ في الصفحات المقبلة .

(١) - ان هذه المحاكمة منسوبة الى الجملة الغاليلية K (اللادارة) كجسم مقارنة ، لان نتائج نظرية النسبية الخاصة لا تصح الا في مثل هذه الجمل (بالنسبة لـ K' يوجد حقل ثنائي) . (المؤلف) .

يمكن ايضا ان ننسب هذه المحاكمة الى راصد موجود في مركز القرص ، لانه ساكن بالنسبة لـ K (المترجم) .

٢٤ - المتصل الإقليدي والمتصل الإقليدي

ان سطح المنضدة الرخامي منبسط امامي . واستطيع ان اذهب من نقطة منه الى اية نقطة اخرى وذلك بأن امر باستمرار من نقطة اخرى « تجاورها » وهكذا دواليك عددا (كبيرا) من المرات ، او ، بتعبير آخر ، بالسير نقطة فنقطة دون ان اقوم بأية « قفزة » . انني على يقين من ان القاريء سيدرك بوضوح كاف ما اعني بكلمتي « تجاور » و « قفزة » (اذا لم يكن متحدثا كثيرا) . ونعبر عن خاصية السطح هذه بقولنا انه يشكل متصلا .

لنتصور الآن اننا صنعنا عددا كبيرا من القضبان الصغيرة بطول واحد وان طول كل منها صغير بالنسبة لابعاد لوح الرخام . وعندما اقول انها متساوية الطول اقصد انه يمكن وضع واحد فوق الآخر دون ان يزيد عليه او ينقص عنه شيئا . ثم نصف اربعة من هذه القضبان بحيث تشكل مضلعا رباعيا (مربعا) متساوي القطرين . ولكي نتأكد من تساوي القطرين نستعمل قضيبا عياريا صغيرا . والى هذا المربع نضيف مربعات اخرى تماثله ، وبحيث لا يشترك اي مربع مع مربع آخر الا بقضيب واحد . ونستمر بهذا العمل حتى نغطي لوح الرخام كله بالمربعات . فكل ضلع مربع في هذا الترتيب ينتمي الى مربعين فقط وكل ذروة تنتمي الى اربعة مربعات .

اننا سنحقق اعجوبة لو استطعنا اتمام هذه المهمة دون ان تقع في مصاعب عظيمة . لنفكر فقط فيما يلي ، اذا حدثا والتقى ثلاثة مربعات في ذروة فان ضلعين من المربع الرابع يصبحان جاهزين ، وكنتيجة لذلك يصبح عندئذ موضعا الضلعين الباقيين منه معينين تماما . لكنني لن استطيع بعدئذ ان اتدبر الامر بحيث يتساوى قطر هذا المربع الاخير . فاذا تساويا من تلقاء نفسيهما فان ذلك يكون محاباة مواتية يقدمها لنا لوح الرخام والقضبان الصغيرة ،

وسأكون لها مندهشا بامتنان . ولا بد ان نواجه مفاجآت كثيرة من هذا النوع قبل ان ننجح في هذا العمل .

فاذا سار كل شيء على ما يرام أقول ان نقاط لوح الرخام تشكل متصلا اقليديا بالنسبة للقضيب الصغير الذي استعملناه ك « مسافة » (مجال خطي) . واذا اخترت احدى الدرى كنقطة « اصل » أستطيع ان احدد مكان أية ذروة أخرى ، بالنسبة للاصل ، بعددين . وفي سبيل ذلك لا احتاج الا ان اعرف عدد القضبان التي يجب ان امر عليها ، انطلاقا من الاصل نحو « اليمين » ثم نحو « الاعلى » حتى اصل الى ذروة المربع المستهدفة . وهذان العددان هما عندئذ « الاحداثيان الديكارتيان » لهذه الذروة في « جملة الاحداثيات الديكارتية » المعنية بترتيب القضبان الصغيرة .

فاذا ادخلنا التعديل الاتي على هذه التجربة التجريدية فلا بد ان نلاحظ وجود حالات لا يمكن ان تنجح فيها هذه التجربة . سنفترض ان القضبان « تمددت » بمقادير متناسبة مع ازدياد درجة الحرارة . اي نسخن الجزء المركزي من لوح الرخام ، ولا نسخن محيطه ، ففي هذه الحالة يبقى الثنان من القضبان الصغيرة منطبقين في كل موضع من اللوح . لكن المربعات التي انشأناها لا بد ان تصيبها الفوضى اثناء التسخين لان القضبان الموجودة في المنطقة المركزية تتمدد بينما لا تتمدد القضبان القريبة من المحيط .

فبالنسبة لقضباننا الصغيرة - التي اتخذناها واحدة للطول - لا يعود لوح الرخام متصلا اقليديا ، ولا نعود قادرين على تعريف احداثيات ديكارتية مباشرة بواسطة القضبان ، لان الانشاء السابق لا يعود قائما كما كان . ولكن بما انه لا تزال توجد اشياء لم تتأثر كما تأثرت القضبان (او لم تتأثر بالمرّة) بتسخين اللوح ، فمن الممكن بالطبع ان نحفظ بوجهة نظرنا بأن اللوح « متصل اقليدي » . وهذا يمكن ان يتم بصورة مرضية باصدار اعتبارات اكثر حذقا بخصوص عملية القياس او مقارنة الاطوال .

لكن ، اذا كانت القضبان من كل جنس (اي من اية مادة) ستتصرف بأسلوب واحد بتأثير درجة الحرارة في شتى مناطق لوح الرخام ، واذا لم

تكن نملك اية وسيلة لكشف تأثير درجة الحرارة غير السلوك الهندسي لقضباننا في تجارب تشبه تلك التي شرحناها آنفا ، فان احسن حل هو ان نعطي للمسافة بين نقطتين من اللوح القيمة واحد ، شرط ان ينطبق طرفا القضيب على هاتين النقطتين ، والا فكيف يجب ان نعرف المسافة دون الاستعانة بطريقتنا هذه ودون ان يكون الاسلوب اعتباريا جدا ؟ فطريقة الاحداثيات الديكارتية ستفقد عندئذ اعتبارها وستحل محلها طريقة اخرى تنبذ صحة الهندسة الاقليدية من اجل اجسام صلبة (١) . وسيلاحظ القارئ ان الوضع هنا يقابل الوضع الذي كشفته فرضية النسبية العامة (فصل ٢٣) .

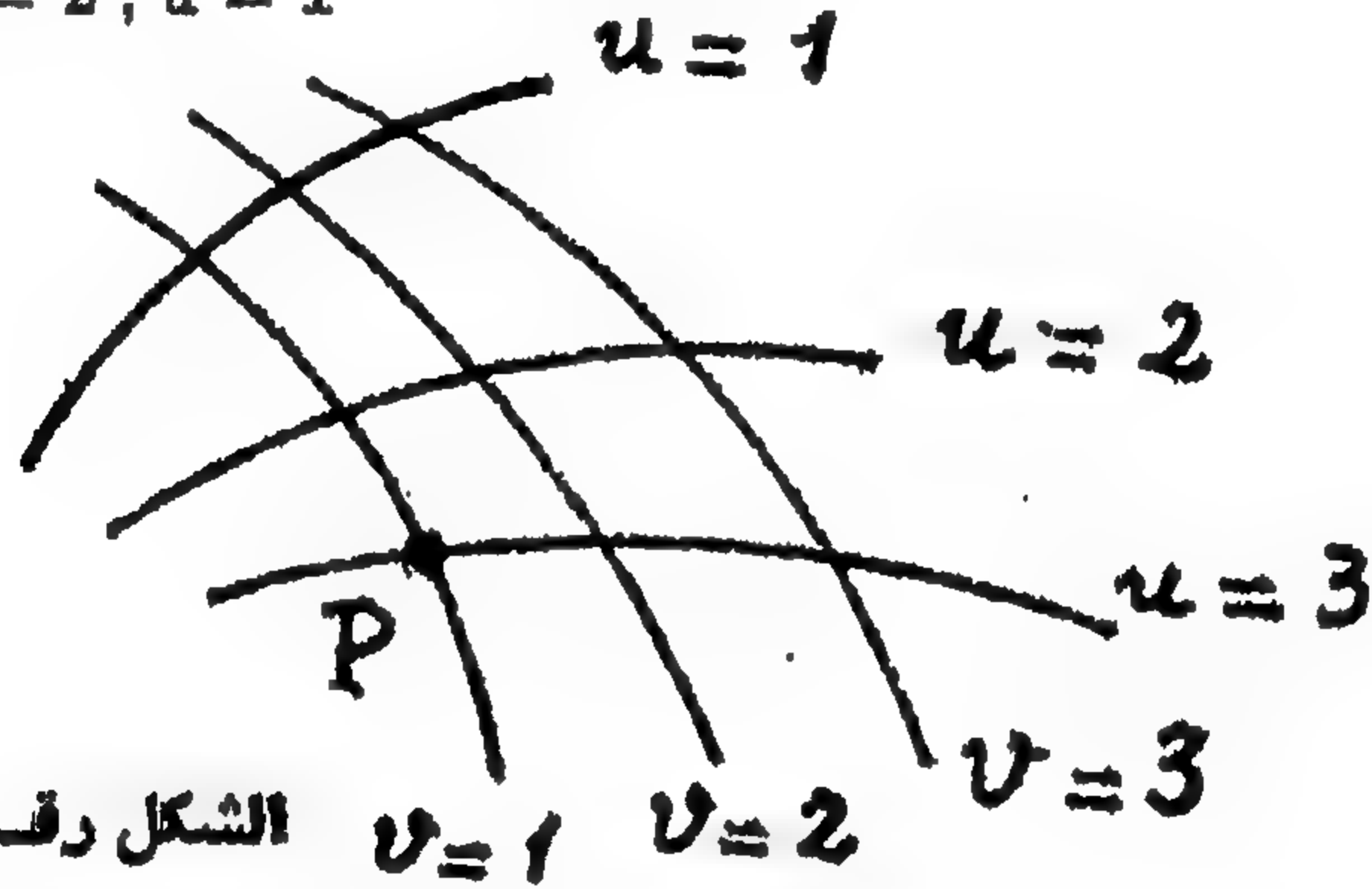


(١) — لقد عالج الرياضيون مسألتنا هذه كما يلي : اذا اعطينا سطحاً (كمجسم اهليلجي مثلا) في الفضاء الاقليدي الثلاثي الابعاد فسنجد من اجل هذا السطح هندسة ذات بعدين ، كهندسة المستوي تماما . وقد اخذ (غوص) على حاقه معالجة الهندسة ذات البعدين هذه من مبادئ اولى ، دون ان يعتمد على واقع ان هذا السطح ينتمي الى متصل اقليدي ذي ثلاثة ابعاد . فالذا تصورنا انشاء مصنوعا من قضبان صلبة على السطح (كما على لوح الرخام) فسنجد ان القوانين التي تسود عليه تختلف من القوانين السائدة في الهندسة الاقليدية المستوية . فليس السطح متصلا اقليديا بالنسبة للقضبان ولا نستطيع تعريف احداثيات ديكارمية على السطح . وقد دل غوص على المبادئ التي يمكن ان نعالج بها العلاقات على هذا السطح ، ووضح بذلك طريقة ريمان في معالجة المتصلات اللا اقليدية العديدة الابعاد . وبذلك حل الرياضيون هذه المسائل الشكلية التي نصادفها في نظرية النسبية العامة .

٢٥ - الإحداثيات الفوقية

ان الجمع بين التحليل والهندسة في معالجة هذه المسألة تتم ، بموجب اعمال غوص GAUSS ، وفق الطريقة التالية . نتصور مجموعة منحنيات اختيارية (شكل ٤) مرسومة على سطح المنضدة ، نرسم لها بالمنحنيات (U) ونبدل على كل منها بعدد . وقد رسمنا في الشكل المنحنيات

$$u = 3, u = 2, u = 1$$



وبين المنحنيين $u = 1$ و $u = 2$ ، مثلاً ، نتصور عددا لا متناهيا من المنحنيات التي يجب ان ترسم ، وكلها تتعلق باعداد حقيقية محصورة بين 1 ، 2 . وبذلك يكون لدينا مجموعة من المنحنيات u ذات « كثافة لا متناهية » تغطي سطح المنضدة كله . ان ايا من هذه الخطوط لا يقطع ايا آخر ولا يمر بكل نقطة من سطح المنضدة سوى خط واحد . وبذلك نعلق بكل نقطة من سطح لوح الرخام قيمة ل u معينة تماما . وبشكل مشابه نتصور مجموعة منحنيات V مرسومة على المنضدة وتتمتع بالخواص التي تتمتع بها منحنيات u ، فهي ذات اشكال اختيارية ونعلق بها اعدادا كما سلف ... ينتج من ذلك انه قد نعلق بكل نقطة من سطح المنضدة قيمة عددية ل u وقيمة عددية ل V . نسمي هذين العددين احداثيي النقطة (احداثيين فوصيين) على المنضدة . فالنقطة (P) مثلاً ، على الشكل ٤ ، لها الاحداثيان

الفوسيان $V = 1, u = 3$ ، والنقطتان المتجاورتان $(P \text{ و } P')$ تتعلقان بالاحداثيين :

$$P : u, v$$

$$P' : u + du, v + dv$$

حيث du, dv يعنيان عددين صغيرين جدا . وبطريقة مشابهة يمكن ان ندل على المسافة (المجال الخطي) بين P و P' ، كما نقيسها بقضيب صغير ، بالعدد الصغير جدا ds . وبموجب فوس نجد

$$ds^2 = g_{11} du^2 + 2g_{12} du dv + g_{22} dv^2$$

حيث g_{11}, g_{12}, g_{22} مقادير تتعلق بشكل معين تماما بـ u, v . وهي تحدد سلوك القضبان بالنسبة لمنحنيات u ومنحنيات v ، وبالتالي بالنسبة لسطح المنضدة . فعندما تكون نقاط السطح المعتبر مؤلفة متصلا اقليديا بالنسبة لقضبان القياس ، وفي هذه الحالة فقط ، يمكن ان نرسم المنحنيات u والمنحنيات v وان نعلق بها اعدادا بحيث نحصل بكل بساطة على :

$$ds^2 = du^2 + dv^2$$

وضمن هذه الشروط فقط تكون المنحنيات خطوطا مستقيمة بالمعنى الاقليدي ومتعامدة . فهنا تنقلب الاحداثيات الفوسية الى احداثيات ديكارتية يتضح اذن ان الاحداثيات الفوسية ليست اكثر من تعليق مجموعتين من الاعداد بنقاط السطح المعتبر بحيث تتعلق نقطتان متجاورتان « من المكان » بشائيتين عدديتين لا تختلفان فيما بينهما الا بعددين صغيرين جدا .

ان هذه المحاكاة تصبح في متصل ذي بعدين . لكن طريقة فوس يمكن ان تطبق ايضا على متصل ذي ثلاثة ابعاد او اكثر . فاذا كنا مثلا ازاء متصل ذي اربعة ابعاد نستطيع ان نمثله بالطريقة التالية :

نعلق بشكل اختياري بكل نقطة من المتصل اربعة اعداد x_1, x_2, x_3, x_4 ،
معروفة باسم « احداثيات » . فالنقاط المتجاورة تتعلق بقيم متجاورة من
الاحداثيات . فاذا علقنا بالنقطتين المتجاورتين مسافة ds معينة وقابلة
للقياس تماما ومن وجهة نظر فيزيائية ، فائنا نستنتج صيغة من الشكل :

$$ds^2 = g_{11}dx_1^2 + 2g_{12}dx_1dx_2 + \dots + g_{44}dx_4^2.$$

حيث المقادير g_{11} و ... الخ ذات قيم تتغير بتغير مكان النقطة
في المتصل . وعندما يكون المتصل اقليديا حصرا يمكن ان نعلق احداثيات ،
 x_1 و x_4 ، بنقاط المتصل يكون معها :

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2.$$

ففي هذه الحالة نجد في المتصل الرباعي الابعاد علاقات تشبه تلك التي
نجدها في القياسات الثلاثية الابعاد .

على ان طريقة غوص هذه في معالجة ds^2 ، التي شرحناها اعلاه ،
ليست دوما ممكنة . فهي غير ممكنة الا اذا استطعنا اعتبار كل منطقة صغيرة
من المتصل المدروس متصلا اقليديا . وهذا مثلا واضح في حالة لوح رخام
المنضدة وتغير السخونة الموضعي . فدرجة الحرارة ثابتة عمليا من اجل جزء
صغير من اللوح ، وبذلك يكون التصرف الهندسي للقضبان تقريبا كما يجب ان
يكون طبقا لقواعد الهندسة الاقليدية . وعلى هذا فان الاختلالات في انشاء
المربعات ، في الفصل السابق ، لا تظهر بوضوح حتى يمتد هذا الانشاء على
منطقة واسعة من سطح المنضدة .

يمكن ان نجمع هذه النتائج كما يلي : لقد اخترع غوص لمعالجة المتصلات
بصورة عامة طريقة رياضية تتعين فيها « علاقات الاتساع » (المسافات بين
النقاط المتجاورة) . فبكل نقطة من المتصل تتعلق مجموعة من الاعداد
(احداثيات غوصية) بعدد الابعاد التي يتميز بها المتصل . وتتم هذه العملية
بحيث لا يكون لهذا التعليق الا معنى واحد وبحيث لا تختلف هذا الاعداد

(الاحداثيات الفوصية) فيما بينها الا بمقادير صغيرة جدا عندما نمر الى نقطة مجاورة . فجملة الاحداثيات الفوصية هي تعميم منطقي لجملة الاحداثيات الديكارتية . وهي لا تنطبق على المتصلات اللا اقليدية ، بخصوص « الاتساع » او « المسافة » الا اذا امكن اعتبار الاجزاء الصغيرة منها وكأنها متصلات اقليدية .



٢٦ - المتصل المكاني - الزماني في نظرية النسبية الخاصة على اعتبار انه متصل اقليدي

لقد أصبحنا الآن قادرين على ان نصوغ بدقة اكبر فكرة منكوفسكي التي المحنا اليها في الفصل ١٧ . فبموجب نظرية النسبية الخاصة تعطى بعض جمل الاحداثيات افضلية في توصيف المتصل المكاني - الزماني ذي الابعاد الاربعة . وقد سميناهما « جمل الاحداثيات الغاليلية » . فالاحداثيات الاربعة ، x, y, z, t التي تعين الحادث او - بتعبير آخر - تعين نقطة من المتصل الرباعي الابعاد ، تتعرف فيزيائيا بطريقة بسيطة ، كما شرحنا في القسم الاول من هذا الكتاب . والمرور من جملة غاليلية لاخرى تتحرك بالنسبة لها حركة منتظمة يتم على اساس صحة معادلات تحويل لورنتس . وهذه المعادلات تشكل اساسا لاستنباط النتائج من نظرية النسبية الخاصة ، وهي بحد ذاتها ليست اكثر من صيغة لسيادة قانون انتشار الضوء في كل جمل المقارنة الغاليلية .

لقد وجد منكوفسكي ان تحويلات لورنتس تستجيب للشروط البسيطة التالية : لنعبر حادثين متجاورين المسافة بينهما في المتصل الرباعي الابعاد هي ، بالنسبة لجملة المقارنة الغاليلية (K) ، الفروق الاحداثية dx و dy و للمكان و dt للزمان . ولتكن هذه الفروق هي dx', dy', dz', dt' وهي المسافة المكانية - الزمانية بينهما بالنسبة لجملة مقارنة غاليلية اخرى K' . ان هذه القيم تحقق دوما الشرط (١) :

(١) - انظر الملحقين ١ و ٢ . ان العلاقات التي نشقها هناك من اجل الاحداثيات نفسها صحيحة ايضا من اجل الفروق الاحداثية ، وكذلك من اجل التفاضلات الاحداثية (اللامتناهية في الصغر) .

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 = dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 - c^2 dt'^2.$$

ان صلاحية تحويل لورنتس تنتج من هذا الشرط . ويمكن ان نعبر عنه

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2, \quad \text{كما يلي : ان المقدار}$$

الذي يخص الحادثين المتجاورين في المتصل المكاني - الزماني الرباعي الابعاد ، له قيمة واحدة في أي جسم مقارنة (غاليلي) نختاره . فاذا بدلنا

$$x, y, z, t \quad \text{بـ} \quad \sqrt{-1} ct, x_1, x_2, x_3, x_4$$

نجد ان المقدار :

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

ذو قيمة مستقلة عن اختيار جسم المقارنة . نسمي المقدار ds

« المسافة » بين الحادثين او بين نقطتين في المتصل الرباعي الابعاد .

وهكذا ، اذا اخترنا ، كمتحول زمني ، المتحول التخيلي $\sqrt{-1} ct$

بدلاً من المتحول الحقيقي t ، يمكن ان ننظر الى المتصل المكاني - الزماني -

طبقاً لنظرية النسبية الخاصة - وكأنه متصل « اقليدي » رباعي الابعاد ، وهي

نتيجة تنبع من الاعتبارات الواردة في الفصل السابق .



٢٧ - المتصل المكاني - الزماني لنظرية النسبية العامة ليس متصلا اقليديا

لقد استطعنا في القسم الاول من هذا الكتاب ان نستعمل الاحداثيات المكانية - الزمانية التي تتيح تفسيراً فيزيائياً بسيطاً ومباشراً والتي يمكن ان نتخذ ، كما جاء في الفصل ٢٦ ، احداثيات ديكارتية رباعية الابعاد . وقد كان ذلك ممكناً بالاعتماد على قانون ثبات سرعة الضوء . لكننا راينا في الفصل ٢١ ان انظرية النسبية العامة لا تعترف بهذا القانون . بل اثنا ، على العكس ، توصلنا في هذه النظرية الى ان سرعة الضوء لا بد ان تتعلق بالاحداثيات عندما يوجد حقل ثقالي . ووفقاً لما اوضحناه في الفصل ٢٣ نرى ان وجود الحقل الثقالي يخل بتعريف الاحداثيات والزمن ، ذلك التعريف الذي توصلنا اليه نظرية النسبية الخاصة .

وبامعان النظر في نتائج هذه المحاكمات نجد انفسنا مسوقين الى الاقتناع ، بموجب مبدأ النسبية العام ، بأن المتصل المكاني - الزماني لا يمكن ان يعتبر متصلاً اقليدياً ، ولكننا نحصل هنا على الحالة العامة التي تتعلق بلوح الرخام مع تغيرات درجة الحرارة الموضعية والتي تعرفنا بواسطتها على نموذج من المتصل ذي البعدين . وكما استحال علينا هناك انشاء جملة احداثيات ديكارتية من قضبان متساوية ، يستحيل علينا هنا ان نبني جملة (جسم مقارنة) من اجسام صلبة وميقائيات ذات طبيعة من شأنها ، اذا رصفت بشكل متماسك فيما بينها ، ان تتيح تعيين الموضع والزمن مباشرة : تلك كانت روح الصعوبة التي واجهناها في الفصل ٢٣ .

لكن محاكمات الفصلين ٢٥ و ٢٦ تدلنا على طريقة للتغلب على هذه الصعوبة . نسب المتصل المكاني - الزماني الرباعي الابعاد بوسيلة اختيارية

الى احداثيات فوصية . ونعلق بكل نقطة من المتصل (الحادث) اربعة اعداد x_1, x_2, x_3, x_4 (احداثيات) ليس لها اقل معنى فيزيائي مباشر ولكنها تفيد فقط في ترقيم نقاط المتصل بطريقة مختارة معينة . حتى ان هذا التدبير لا يستلزم ان يكون من نوع يجعلنا نتخذ x_1, x_2, x_3 احداثيات « مكان » و x_4 احداثي « زمان » .

قد يظن القارىء ان تدبير العالم بهذه الطريقة لن يكون ملائما تماما . فماذا يعني ان نعلق بالحادث الاحداثيات المختارة x_1, x_2, x_3, x_4 اذا كانت هذه الاحداثيات نفسها عديمة المعنى ؟ ان تفحص هذا الامر بعناية اكبر يدل على ان هذا القلق لا اساس له . لنعتبر مثلا نقطة مادية ذات حركة من اي نوع . فاذا لم يكن لهذه النقطة سوى وجود مؤقت دون فترة زمنية ، فسنتمكن من توصيفها في المكان - الزمان بمجموعة وحيدة من القيم x_1, x_2, x_3, x_4 . وبذلك يجب ان يتعين وجودها المستمر بعدد لا متناه من امثال مجموعات القيم هذه ، احداثياتها متقاربة لدرجة ان تؤلف استمرارا ؛ وبذلك نحصل على خط (وحيد البعد) في المتصل الرباعي البعد متعلق بالنقطة المادية . وبالطريقة ذاتها تصبح مثل هذه الخطوط في متصلنا متعلقة بعدة نقاط متحركة . والمقولات الوحيدة بخصوص هذه النقاط والتي يمكن ان تتطلب وجودا فيزيائيا هي في الواقع ما نقوله عن لقاءها . ومثل هذا اللقاء ، في معالجتنا الرياضية ، يتجلى في واقع ان الخطين اللذين يمثلان حركتي النقطتين المدروستين لهما مجموعة معينة من قيم احداثيات x_1, x_2, x_3, x_4 ، مشتركة . وبعد تفكير عميق سيقبل القارىء دون شك ان مثل هذه اللقاءات تشكل في الواقع الشيء البارز فعلا ذا الطبيعة المكانية - الزمانية التي نصادفها في المقولات الفيزيائية .

عندما كنا نصف حركة نقطة مادية بالنسبة لجسم مقارنة لم تكن نتكلم عن اكثر من لقاءات هذه النقطة بنقاط خاصة من جسم المقارنة . ويمكن ايضا ان نعين قيم الزمن المستهدفة برصد لقاءات الجسم مع الميقاتيات ، بواسطة رصد لقاء عقارب الميقاتية بنقاط خاصة من المينا . والامر كذلك

بالضبط في حالة عمليات القياس المكانية بواسطة قضبان قياس ، وذلك ما نستنتجه من محاكمة قصيرة .

ان الفكرة التالية صحيحة عموما : ان كل توصيف فيزيائي يتحلل الى عدد من المقولات يتناول كل منها انطباقا مكانيا - زمانيا لحادثين A, B . وكل مقولة من هذا النوع تصاغ ، بلغة الاحداثيات الفوقية ، بانطباق مجموعتي احداثياتهما الاربع x_1, x_2, x_3, x_4 . وهكذا نجد ، في الواقع ، ان التوصيف المكاني - الزماني للمتصل بواسطة الاحداثيات الفوقية يحل محل التوصيف بواسطة جسم المقارنة ، دون ضرر ينجم عن عيوب طريقة التوصيف السابقة ، وهو بذلك لا يرتبط بالخاصية الاقليدية للمتصل التي يجب تمثيلها .



٢٨ - الصياغة السديدة لمبدأ النسبية العام

نحن الآن في وضع يتيح لنا ان نستبدل بالصيغة المؤقتة لمبدأ النسبية العام التي اعطيت في الفصل ١٨ صيغة سديدة . فالنص المستعمل هناك : « ان كل اجسام المقارنة K ، K' ، الخ ، متكافئة في توصيف الظواهر الطبيعية (صياغة قوانين الطبيعة العامة) مهما كانت حالتها الحركية » لا يمكن الاحتفاظ به ، لان استخدام اجسام مقارنة صلبة ، بالمعنى السائد في نظرية النسبية الخاصة ، ليس في الحالة العامة ممكنا في التوصيف المكاني - الزماني . بل ان جملة احداثيات غوص يجب ان تحل محل جسم المقارنة . فالنص التالي ينسجم مع الفكرة الاساسية لمبدأ النسبية العام : « ان كل جمل الاحداثيات الفوقية متكافئة جوهريا في صياغة القوانين العامة للطبيعة » .

ويمكن ان تنص على مبدأ النسبية العام هذا بشكل آخر ايضا يجعله اقرب الى الفهم مما كان عليه عندما كان امتدادا لمبدأ النسبية الخاص . فالمعادلات التي تعبر ، في المبدأ الخاص ، عن قوانين الطبيعة العامة تبقى على شكلها نفسه لدى استعمال تحويل لورنتس في ابدال المتحولات المكانية - الزمانية ، x, y, z, t لجسم مقارنة K (غاليلي) بالمتحولات المكانية - الزمانية x', y', z', t' لجسم مقارنة آخر K' (غاليلي) . ومن جهة اخرى وطبقا لنظرية النسبية العامة ، فان تطبيق ابدالات اختيارية على متحولات غوص x_1, x_2, x_3, x_4 يجعل المعادلات تتحول الى معادلات من الشكل نفسه ، لان كل تحويل (لا تحويل لورنتس فحسب) يعبر عن انتقال من جملة احداثيات فوقية الى اخرى .

واذا رغبتنا في الالتزام بوجهة نظرتنا « العتيقة » الى الامور ، نستطيع ان نصف التطور الذي تتضمنه الفكرة الاساسية لنظرية النسبية العامة كما

يلي : ان نظرية النسبية الخاصة تعتمد على المجالات الفاليلية ، اي تلك التي لا يوجد فيها حقل ثقالي . فهذه النظرية تعتمد على اجسام مقارنة غاليلية ، اي على جسم صلب نختار حالته الحركية بحيث يكون قانون غاليله في الحركة المنتظمة للنقاط المادية « المعزولة » صحيحا بالنسبة له .

هذا وتوحي بعض الاعتبارات بوجوب نسب المجالات الفاليلية نفسها الى اجسام مقارنة لا غاليلية ايضا . وسيوجد عندئذ حقل ثقالي ، من نوع خاص ، بالنسبة لهذه الاجسام (انظر الفصل ٢٠ والفصل ٢٣) .

ففي حقول الثقائل لا يوجد اشياء تتخذ اجسام مقارنة ذات خواص اقليدية ، وعلى هذا فان جسم المقارنة الصلب الموهوم عديم الفائدة في نظرية النسبية العامة . فعمل الميقاتيات يتأثر ايضا بالحقول الثقالية ، وبشكل يجعل اي تعريف فيزيائي للزمن ، مستند مباشرة على استخدام الميقاتيات ، تعريفا لا يتمتع بنفس الدرجة من الثقة التي يتمتع بها في نظرية النسبية الخاصة .

ولهذا السبب لا تستخدم اجسام مقارنة صلبة ، فهي بمجملها ليست متحركة كيفما اتفق فحسب ، بل وتعاني ايضا تغيرات في الشكل تلقائية اثناء حركتها . والميقاتيات ، التي يكون قانون الحركة من اجلها كيفما اتفق ، مهما كان فوضويا ، تفيد في تعريف الزمن : علينا ان نتصور كل واحدة من هذه الميقاتيات مثبتة في نقطة من جسم المقارنة اللاصلب . وليس على هذه الميقاتيات سوى ان تحقق شرطا واحدا ينص على ان تكون « مقروءاتها » المرصودة في آن واحد على ميقاتيات متلاصقة (في المكان) متفاوتة فيما بينها بفروق لا متناهية في الصغر . وان جسم المقارنة اللاصلب هذا ، الذي يمكن ان نسميه « رخوي المقارنة » يكافئ رئيسيا جملة احداثيات غوصية رباعية الابعاد مختارة كيفما اتفق . وان ما يمنع هذا « الرخوي » بعض التبرير عندما نقارنه بجملة الاحداثيات الغوصية هو الاحتفاظ (الغير مسوغ حقا) الشكلي بالوجود المنفصل للاحداثيات المكانية في مواجهة الاحداثي الزمني . فكل نقطة من الرخوي تعامل كنقطة - مكان ، وكل نقطة مادية تعتبر ساكنة بالنسبة اليه كجسم ساكن ، طالما بقينا نتخذ الرخوي كجسم مقارنة . ويقتضي مبدأ النسبية

العام امكانية استخدام كل هذه الرخويات كأجسام مقارنة ، بدون تمييز
ويقدر واحد من النجاح ، لدى صياغة القوانين العامة للطبيعة ، اي ان القوانين
نفسها يجب ان تكون مستقلة عن اختيار الرخوي .

هذا وان القدرة العظيمة لبدا النسبية العام تكمن في المحدودية المعقولة
التي يفرضها على قوانين الطبيعة بنتيجة ما رايناها اعلاه .

* * *

٢٩ - حل مسألة التناقل بالإستنتاج

مبدأ النسبية العام

إذا كان القارىء قد استوعب كل محاكماتنا السابقة فلن يجد صعوبة في فهم الطرائق التي تقود الى حل مسألة التناقل .

ننطلق من التأمل في مجال غاليلي ، اي في مجال لا يحوي حقلا ثقاليا بالنسبة لجسم مقارنة غاليلي K فسلوك قضبان القياس والميقاتيات ، بالنسبة لـ K ، معروف من نظرية النسبية الخاصة ، وكذلك سلوك النقاط المادية « المعزولة » ، فهي تتحرك حركة منتظمة في خطوط مستقيمة .

نسب الآن هذا المجال الى جملة احداثيات فوضوية او الى رخوي نتخذه جسم مقارنة . فبالنسبة لـ K' يوجد حقل ثقالي G (من نوع خاص) . فنحن نتعلم سلوك قضبان القياس والميقاتيات ، والنقاط المادية المتحركة بحرية ، بالنسبة لـ K' من التحويل الرياضي فقط . ونفسر هذا السلوك بأنه سلوك نقاط مادية متحركة وقضبان قياس وميقاتيات بفعل حقل ثقالي G . وعلى هذا ندخل هنا فرضية : ان تأثير الحقل الثقالي على قضبان القياس وعلى الميقاتيات وعلى النقاط المتحركة يستمر في فعله وفق قوانين واحدة : حتى ولو لم يكن الحقل الثقالي الفاعل قابلا للاشتقاق من حالة غاليلية خاصة بواسطة تحويل احداثيات فقط .

والخطوة التالية تقضي بتحري السلوك المكاني - الزماني للحقل الثقالي G ، وذلك كما يستنبط من الحالة الغاليلية الخاصة بواسطة تحويل احداثيات فقط . ان هذا السلوك يجب ان يصاغ بقانون صالح مهما كانت وسيلة اختيار جسم المقارنة (الرخوي) المستخدم في التوصيف .

ان هذا القانون لن يكون القانون العام الذي يحكم الحقل التثاقلي ، لان الحقل التثاقلي الذي ندرسه حقل من نوع خاص . ولايجاد القانون العام للتثاقل ، مانزال بحاجة للحصول على تعميم للقانون كما وجدناه اعلاه . وهذا ما يمكن ان نحصل عليه ، موضوعيا وفي كل الاحوال ، بأخذ المتطلبات التالية بعين الاعتبار :

أ - يجب على التعميم المطلوب ان يستجيب ايضا لمسلمة النسبية العامة .

ب - اذا وجدت اية مادة في المجال المدروس فان كتلتها العطالية فقط ، وبالتالي وبموجب ما جاء في الفصل ١٥ ، طاقتها فقط ذات اهمية في توليد حقل بتأثيرها .

ج - يجب على الحقل التثاقلي والمادة معا ان يطيعا قانون انخفاض الطاقة (وقانون انحفاظ الاندفاع (١)) .

وفي النهاية ، يتيح لنا مبدأ النسبية العام معرفة تأثير الحقل التثاقلي على سير جميع العمليات التي تتم وفق قوانين معروفة في حالة غياب الحقل التثاقلي ، اي القوانين التي اوجدناها في جمل المقارنة في نظرية النسبية الخاصة . وبهذا الصدد نلجأ مبدئيا الى تطبيق الطريقة التي شرحناها منذ قليل بخصوص قضبان القياس والميقاتيات والنقاط المادية المتحركة بحرية .

ان نظرية التثاقل المستنبطة بهذا الاسلوب من مسلمة النسبية العامة تسمو ، لا بجمالها فحسب ، ولا ينظافتها من العيب الذي يشوب الميكانيك التقليدي والذي فصلناه في الفصل ٢١ ؛ ولا بتفسيرها للقانون التجريبي في تساوي الكتلة العطالية الثقالية ، بل وايضا في تفسير نتائج ارضاد فلكية عجز الميكانيك التقليدي عن تفسيرها .

هذا واذا اقتصرنا لدى تطبيق النظرية ، على الحالة التي يمكن اعتبار الحقل فيها ضعيفا والتي تكون فيها كل الكتل متحركة ، بالنسبة لجبهة

(١) الاندفاع هو حاصل ضرب كتلة الجسم بسرعه (المترجم) .

الاحداثيات ، بسرعات صغيرة ازاء سرعة الضوء ، نحصل عندئذ على نظرية نيوتن كتقريب اولي . وبذلك نحصل هنا على نظرية نيوتن دون اي افتراض خاص ، بينما اضطر نيوتن الى ادخال فرضية ان قوة التجاذب المتبادل بين نقطتين ماديتين متناسبة عكسيا مع مربع المسافة بينهما . واذا زدنا في دقة الحسابات تظهر انحرافات عن نظرية نيوتن ، لكن جميع هذه الانحرافات تقريبا قد تتملص عمليا ، بسبب ضآلتها ، من محك الرصد التجريبي .

وهنا يجب ان نلفت النظر الى احد هذه الانحرافات . ان الكوكب ، بموجب نظرية نيوتن ، يدور حول الشمس في مدار اهليلجي موضعه ثابت دوما بالنسبة للنجوم الثابتة ، اذا صرف النظر عن حركة هذه النجوم وعن تأثير الكواكب الاخرى في الكوكب المدروس . واذا ادخلنا على حركة الكوكب التصحيحات الناجمة عن الكواكب الاخرى ، واذا كانت نظرية نيوتن صحيحة بالضبط ، فاننا سنجد حتما ان المدار اهليلجي وثابت الموضع بالنسبة للنجوم الثابتة . ان هذا الاستنتاج الذي يمكن وضعه على محك الرصد الدقيق قد تأكد من اجل كل الكواكب الا واحدا وبدقة امكن الوصول اليها بمهارة بفضل الارصاد التي تمت مؤخرا . والشذوذ الوحيد يأتي من عطارد ، اقرب الكواكب الى الشمس . ومعروف ، منذ عصر لوفرييه LEVERRIER .

ان اهليلج مدار عطارد ، بعد تصحيح حسابه بتأثير ما ذكر اعلاه ، ليس مستقرا في موضعه بالنسبة للنجوم الثابتة ، بل انه يدور بسرعة بطيئة جدا في مستوي المدار وفي اتجاه الحركة المدارية . وقد قيست سرعة دوران هذا الاهليلج فوجد انها تساوي ٤٣ ثانية قوسية في القرن الزمني الواحد بارتفاع لايزيد عن بضع ثوان قوسية . ان هذه الظاهرة يمكن تفسيرها ، في الميكانيك التقليدي ، بالاعتماد على فرضيات ضئيلة الاحتمال ، اخترعت خصيصا لهذا الغرض فقط .

اما في نظرية النسبية العامة فقد وجد ان الاهليلج المداري لكل كوكب حول الشمس يجب حتما ان يدور بالصورة المشار اليها : لكن سرعة الدوران هذه هي ، باستثناء حالة عطارد ، من الضالة للدرجة يتعذر كشفها بوسائل

الرصد المتوفرة حتى اليوم ، لكنها ، في حالة عطار د ، يجب ان تبلغ ٤٣: ثانية قوسية في القرن ، وهي نتيجة تتفق بدقة كبيرة مع نتيجة الرصد الفلكي .

وفيما عدا ذلك ، امكن الحصول من هذه النظرية على استنتاجين يمكن وضعهما على محك الرصد وهما : انحناء الاشعة الضوئية بفعل حقل الشمس

التثاقلي(١) ، وانزياح اماكن الخطوط الطيفية ، الواردة اليها من النجوم الكبيرة ، بالنسبة لاماكن الخطوط الطيفية التي نولدها بوسائل مماثلة في المخبر (من نفس الجنس من اللرات) (٢) . وهذان الاستنتاجان تاكدا كلاهما .



(١) - كشفه ايدنغتون EDDINGTON وسواه للمرة الاولى عام ١٩١٩ . (انظر الملحق ٣) .

(٢) - كشفه آدمز ADAMS عام ١٩٢٤ . (انظر الملاحظة في ذيل الملحق ٣) .

القِسْمُ الثَّالِثُ

تأملات في العالم الكوني بمجملته

٣. مصاعب نظرية نيوتن في معرفة العالم الكوني

بالإضافة الى الصعوبة التي ناقشناها في الفصل ٢١ يوجد صعوبة ثانية في علم الميكانيك السماوي ، كان الفلكي سيليجر SEELIGER ، في حدود علمي ، اول من ناقشها بالتفصيل . اذا تفكرنا في مسألة الكيفية التي يجب ان ننظر بها الى العالم بمجمله فان اول جواب يخطر على البال هو يقينا التالي : ان العالم الكوني لامتناه فيما يخص المكان (والزمان) . اذ ثمة نجوم في كل مكان والدرجة ان كثافة المادة ، رغم تفاوتها الكبير بين حيز وآخر تتفاوت مع ذلك حول قيمة وسطية واحدة . وبتعبير آخر : مهما توغلنا بعيدا في الفضاء سنجد في كل مكان سربا محدودا من النجوم الثابتة من جنس واحد ومن كثافة واحدة تقريبا .

ان هذه الصورة لا تنسجم مع نظرية نيوتن . فهذه النظرية تتطلب بالاحرى وجود نوع من المركز تكون فيه كثافة النجوم عظيمة ، ويجب على هذه الكثافة ان تتناقص لدى الابتعاد عن هذا المركز حتى تتلاشى على مسافات ساحقة يأتي بعدها منطقة لا متناهية من الخلاء . فالعالم النجمي يجب ان يكون جزيرة محدودة الاتساع في بحر من الفضاء اللامتناهي (١) .

(١) - البرهان - تدل نظرية نيوتن على ان عدد « خطوط القوة » الانية من اللانهاية والمنتهية على الكتلة m متناسب مع الكتلة m . فاذا كانت الكثافة الكتلية ρ ثابتة وسطيا عبر العالم فان اي حجم كروي V سيحوي الكتلة الوسطية $\rho_0 V$ ، مما يجعل عدد خطوط القوة التي تخترق السطح الكروي F نحو الداخل متناسبا مع $\rho_0 V$. فعدد الخطوط التي تدخل عبر واحدة المساحة من هذا السطح متناسب اذن مع $\rho_0 \frac{V}{R^2}$ ، اي مع $\frac{\rho_0}{R}$ (R : نصف قطر الكرة) . فشدة الحقل عند السطح يجب بالتالي ان تصبح لا متناهية في الكبر عندما يتعاظم نصف القطر R ، وهذا مستحيل .

ان هذه الفكرة ليست مرضية جدا بحد ذاتها . وتتناقض معقوليتها
اكثر لانها تنتهي بنا الى القول بأن الضوء الصادر عن النجوم ، وكذلك افراد
المجموعة النجمية ، تمر بصورة دائمة الى الفضاء اللامتناهي ، دون عودة ودون
ان تدخل مرة اخرى في تفاعل مع اجرام الطبيعة الاخرى . ان عالما ماديا من
هذا القبيل لا بد ان يؤول ، حتما بالتدريج ، الى ما يشبه العدم .

وللخروج من هذا المأزق اقترح سليجر تعديلا على قانون نيوتن ، افترض
فيه ان قوة التجاذب بين كتلتين تتناقص ، عندما تتعاضد المسافة بينهما ،
بأشد مما ينتج من قانون مقلوب مربع المسافة . وبهذه الوسيلة يمكن للكثافة
المادية الوسطية ان تكون ثابتة في كل حين ، حتى في اللانهاية ، دون ان يؤدي
ذلك الى نشوء حقول ثققل لامتناهية الشدة . وبذلك نتخلص من الفكرة
البغيضة القائلة بان الكون يجب ان يتضمن شيئا يشبه المركز . لكن من
الواضح اننا نشترى خلاصنا من المصاعب الاساسية المذكورة ، بالثمن الذي
هو تعديل قانون نيوتن وتعقيده ، هذا القانون الذي يفتقر الى الاساسين
التجريبيين والنظريين معا . فنحن نستطيع ان نتخيل عددا لا يحصى من
القوانين التي يمكن ان تؤدي المهمة ذاتها ، دون ان نتمكن من تقديم سبب
يجعلنا نفضل احدها على الآخرين ، لان اي واحد من هذه القوانين لن يستند
الى اسس مبدئية نظرية عامة اضعف من الاسس التي يستند عليها قانون
نيوتن .



٣١ - إكسكانية عالم « منتر » و « لا محدود » معاً .

لكن التفكير في بنية العالم يتحرك أيضاً في اتجاه آخر تماماً . فتطور علم الهندسة اللاقليدية يقود أبلى الاعتراف بواقع أننا نستطيع ان نشك في لانهائية فضاءنا دون ان ندخل في تعارض ، لا مع اصول التفكير ولا مع التجربة (ريمان ، هلمهولتز HELMHOLTZ) . وقد عالج هلمهولتز وبوانكاريه POINCARÉ هذه المسائل بالتفصيل وبوعي لا يعاو عليه وعي ، لدرجة انني لن استطيع سوى التلميح اليها هنا .

فقبل كل شيء نتصور كونا ذا بعدين مكانيين ، وكائنات مسطحة مزودة باللات مسطحة ، وخصوصاً بقضبان قياس صلبة مسطحة ، وحررة الحركة في مستو . فبالنسبة لهذه الكائنات لا يوجد اي شيء خارج هذا المستوى : كل ما يلاحظونه من احداث تقع لهم او لـ « اشياهم » هو ما تتضمنه حقيقة مستويهم . فانشاءات مستوي الهندسة الاقليدية ، بصورة خاصة ، يمكن ان تتم بواسطة القضبان ، كالانشاء الشبكي الذي عرضناه في الفصل (٢٤) . فعالم هذه الكائنات هو ، بخلاف عالمنا ، عالم ذو بعدين ، لكنه ، كعالمنا ، واسع الى اللانهاية . كما يوجد في عالمهم مكان لعدد لا متناه من المربعات المتساوية المصنوعة من قضبان ، اي ان حجم (سطح) هذا المكان لا منته . فاذا قالت هذه الكائنات ان عالمها « مستو » ، فان لهذا القول معنى ، لانهم يعنون ان باستطاعتهم انجاز انشاءات لمستوي الهندسة الاقليدية بواسطة قضبانهم . وبهذا الصدد تمثل افراد قضبانهم المسافة نفسها دوماً ، وبصورة مستقلة عن موضعها .

النتصور الآن كونا ثانيا ذا بعدين ايضاً ، ولكنه هذه المرة سطح كروي بدلا من سطح مستو . والكائنات المسطحة بقضبان قياسها واشياها الاخرى منطبقة تماماً على هذا السطح ولا تستطيع مفادته . ان كل عالمهم المحسوس

لا يتعدى سطح الكرة . فهل بإمكان هذه الكائنات ان تعتبر هندسة عالمها هندسة مستوية وتعتبر مع كل هذا قضبانها تجسيدات « المسافة » ؟ ليس بإمكانهم ذلك . لانهم لو حاولوا ان يحققوا خطا مستقيما فسيحصلون على منحني ندعوه نحن « الكائنات ذات الابعاد الثلاثة » دائرة عظمى ، اي خطا مغلقا على نفسه وذا طول منته ومعين ويمكن ان يقاس بواسطة قضبان القياس . وبذلك يكون لهذا العالم مساحة منتهية يمكن تشبيهها بمساحة مربع منشأ بالقضبان . ان الروعة العظيمة التي تبرز من هذه المحاكمة تكمن في التعرف على واقع ان عالم هذه الكائنات منته وليس له مع ذلك حدود .

لكن كائنات السطح الكروي لا تحتاج لدورة كاملة كي يكتشفوا انهم لا يعيشون في عالم اقليدي . بل يستطيعون ان يقتنعوا بذلك في كل جزء من « عالمهم » شرط ان لا يستعملوا قطعة منه اصغر من اللازم . ولاجل ذلك يرسمون « خطوطا مستقيمة » (وهي اقواس من دوائر ، في عالم الابعاد الثلاثة) تنطلق من نقطة واحدة وبطول واحد في كل الاتجاهات . انهم سيطلقون اسم « دائرة » على الخط الذي يصل بين نهايات هذه الخطوط . ففي سطح مستوي يكون حاصل قسمة محيط الدائرة على قطرها ، مقاسين بقضيب واحد ، مساويا وفق الهندسة الاقليدية في المستوي العدد الثابت $\pi = 3,14 \dots$ المستقل عن قيمة القطر . لكن كائناتنا المسطحة ستجد على سطحها الكروي ان حاصل القسمة هذا يساوي القيمة :

$$\pi = \frac{\sin\left(\frac{r}{R}\right)}{\left(\frac{r}{R}\right)}$$

اي قيمة اصغر من π ، ويكون الفرق اكبر كلما كان نصف قطر الدائرة قريب القيمة من نصف قطر « العالم الكروي » R . وبواسطة هذه العلاقة يمكن لكائنات السطح الكروي ان يحسبوا نصف قطر كونهم العالمي (العالم) حتى عندما يستخدمون قسما صغيرا فقط من عالمهم الكروي في سبيل ذلك . ولكن اذا كان هذا القسم صغيرا جدا في الواقع فلن يستطيعوا البرهان على انهم يعيشون على « عالم » كروي لا على عالم اقليدي مستوي .

لان القسم الصغير من السطح الكروي لا يختلف الا قليلا عن قطعة مستوية ذات اتساع مساو .

وهكذا ، اذا كانت كائنات السطح الكروي تعيش على كوكب لا تحتل منظومته الشمسية سوى جزء صغير مهمل من الكون الكروي ، فلن يكون لديهم وسيلة لمعرفة فيما اذا كانوا يعيشون في كون منته ام لا منته . لان « جزء الكون » الذي يظالونه هو في الحالتين مستويا عمليا ، او اقليديا . وينتج مباشرة من هذه المناقشة ومن اجل كائنات السطح الكروي ان محيط الدائرة يتزايد اولا مع نصف قطرها حتى يصل الى « محيط دائرة الكون » ، ثم يتناقص تدريجيا الى الصفر مع استمرار تزايد نصف القطر . وخلال هذه العملية تستمر مساحة الدائرة في التزايد اكثر فاكثر حتى تصبح مساوية للمساحة الكلية لمجمل « كرة العالم » .

هذا وربما يتساءل القارئ لماذا وضعنا « الكائنات » على سطح كروي بدلا من سواه من السطوح المغلقة . ان هذا الاختيار له ما يسوغه في واقع ان السطح الكروي ، بخلاف سواه ، هو السطح الوحيد الذي يتمتع بخاصة ان كل نقاطه متكافئة . وانا اقبل ان نسبة المحيط C للدائرة على نصف قطرها r تتعلق بـ r ، اما من اجل قيمة معينة لـ r فطول المحيط هو نفسه من اجل كل نقطة من « العالم — الكرة » ، وبتعبير آخر نقول ان « العالم الكرة » هو « سطح ذو انحناء ثابت » .

يوجد لهذا الكون الكرة ذي البعدين شبيه ذو ثلاثة ابعاد ، هو ، بالاسم ، الفضاء الكروي الثلاثي الابعاد الذي اكتشفه ريمان . ونقاطه متكافئة بالمعنى السابق نفسه . وهو ذو حجم منته يتعين بنصف قطره $(2\pi^2 R^3)$ ، فهل من الممكن تصور فضاء كروي ؟ ان تصور الفضاء لا يعني سوى ان نتصور مختصرا لخبرتنا عن « الفضاء » ، اي للخبرة التي نستطيع ان نكتسبها من حركة الاجسام « الصلبة » . وبهذا المعنى نستطيع ان نتصور فضاء كرويا .

لنفترض اننا ننشئ مستقيعات او اوتارا مشدودة في كل الاتجاهات انطلاقا من نقطة ، واننا نقتطع من كل منها مسافة واحدة r بواسطة قضبان

قياس . فالاطراف الاخرى السائبة لهذه الاطوال واقعة على سطح كروي . نستطيع ان نقيس المساحة F لهذا السطح بواسطة مربعات مصنوعة من قضبان القياس . فاذا كان الكون اقليديا يكون $F = 4\pi r^2$ ، اما لو كان كرويا لكان F اصغر من $4\pi r^2$ دوما . ولدى ازدياد r تزداد F من الصفر الى قيمة عظمى تتعين بـ « نصف قطر العالم » . لكن استمرار r في التزايد يجعل المساحة تتناقص تدريجيا حتى الصفر . ففي البدء تتباعد فيما بينها المستقيمات المنطلقة من النقطة اكثر فأكثر ، ثم تعود فتتقارب حتى تتجمع من جديد في « نقطة مقابلة » لنقطة الانطلاق . وعندئذ تكون قد اخترقت الفضاء الكروي كله . وبذلك نرى ان الفضاء الكروي ذا الابعاد الثلاثة يماثل تماما السطح الكروي ذات البعدين . فهو منته (اي ذو حجم محدود) وليس له حدود .

ويمكن ان نذكر انه يوجد مع ذلك نوع آخر من الفضاء المنحني : « الفضاء البيضوي » . ويمكن ان يتخذ فضاء منحني تماثل « نقطته المتقابلتان » (لا يمكن التمييز بينهما) . فالكون البيضوي يمكن ان يعتبر ، بمعنى ما ، كونا منحني ذا تناظر مركزي .

ينتج مما تقدم اننا نستطيع ان نتصور فضاءات مغلقة وبدون حدود . ومن بين هذه الفضاءات يسمو الفضاء الكروي (والبيضوي) ببساطته ، لان كل نقاطه متكافئة . وبنتيجة هذه المناقشة تبرز للفلكيين والفيزيائيين مسألة اكبر اهمية ، وهي معرفة اذا كان الفضاء الكوني الذي نعيش فيه لا منتهيا ام منتهيا باسلوب الكون الكروي . ان تجربتنا بعيدة عن ان تتيح لنا الاجابة عن هذا السؤال . لكن نظرية النسبية العامة تضعنا على طريق الجواب بدرجة معتدلة من اليقين ، وبهذا الصدد نجد حلا للصعوبة المذكورة في الفصل (٣٠) .



٣٢ - بنية المكان بموجب نظرية النسبية العامة

ان الخصائص الهندسية للفضاء ليست ، في عرف نظرية النسبية العامة، مستقلة بحد ذاتها ، لكنها تتعين بالمادة . وبذلك يمكن ان نستخلص نتائج بخصوص البنية الهندسية للعالم الكوني اذا استندنا فقط في تأملاتنا الى حالة المادة كشيء معلوم ، فنحن نعلم من الخبرة انه ، لدى اختيار جملة احداثيات ملائمة ، تكون سرع النجوم صغيرة اذا قورنت بسرعة الضوء . ونستطيع بذلك ان نتوصل الى نتيجة تشكل معرفة تقريبية بطبيعة العالم الكوني بمجمله ، اذا اعتبرنا المادة وكأنها في حالة سكون .

لقد عرفنا منذ قليل من مناقشتنا السابقة ان سلوك قضبان القياس والميقاتيات يتأثر بالحقل الثقالي ، اي بتوزع المادة . وهذا بحد ذاته كاف لنفي امكانية ان تكون الهندسة الاقليدية صالحة بالضبط في عالمنا الكوني . لكننا يمكن ان نقبل انه لا يختلف الا قليلا عن العالم الاقليدي ، وان هذه الفكرة تبدو هي الاكثر احتمالا ، لان الحسابات تظهر ان خصائص القياسات المساحية للفضاء المحيط بنا لا تتأثر الا قليلا جدا بالكتل حتى ولو بلغت قيمة كتلة شمسنا . ويمكن ان نتخيل ، من وجهة نظر هندسية ، ان عالمنا يتصرف بشكل مشابه لسطح ذي تضاريس في بعض مناطقه المنفردة ، ولكنه لا يختلف في معظم امتداده عن المستوي اختلافا محسوسا : فهو يشبه سطح بحيرة تجعده المويجات . فمثل هذا العالم يمكن ان يسمى ، بشكل مناسب ، شبه اقليدي . وفيما يتعلق بامتداده ، لا بد ان يكون لا منتهيا . لكن الحسابات تكشف ان الكثافة الوسطية للمادة في عالم شبه اقليدي لا بد ان تكون بالضرورة معدومة . فمثل هذا العالم لا يمكن ان تحتل المادة كل مكان فيه : فهو لا بد ان يظهر لنا بصورة غير مرضية كنا رسمناها في الفصل (٣٠) .

ولو كنا ازاء عالم ذي كثافة مادية وسطية تختلف عن الصفر ، مهما كانت ضئيلة ، فلا يمكن عندئذ ان يكون شبه اقليدي . اما اذا كانت المادة موزعة توزيعا متساويا ، فان العالم سيكون بالضرورة كرويا (او بيضويا) . ولما كان التوزيع التفصيلي للمادة في واقعة غير منتظم فان العالم الحقيقي منحرف في مفردات اجزائه عن البنية المتكورة ، اي انه شبه كروي . لكنه لا بد ان يكون منتهيا . والواقع ان النظرية تزودنا بعلاقة (١) بسيطة بين الامتداد المكاني للعالم وبين كثافة المادة فيه .



(١) - نحصل على « نصف قطر » العالم ، R ، من المعادلة : $R^3 = \frac{2}{\kappa \rho}$

ففي جملة واحداث القياس السفشية تعطي هذه المعادلة : $\rho^2 = 1.08.10^{27}$ هي الكثافة المادية الوسطية ، و K ثابت له علاقة بثابت التثاقل النيوتني .

الملحق (١)

طريقة بسيطة لاستنباط تحويل لورنتس

(إضافة للفصل ١١)

التوجه النسبي لجملتي الإحداثيات مرسوم في الشكل (٢) ، حيث المحور X و X' منطبقان دوماً . وفي الملحق الراهن يمكن أن نشطر المسافة شطرين بأن نفحص أولاً وحسراً حوادث تقع على المحور x . وكل حادث من هذا النوع يتمثل بالنسبة لجملة الإحداثيات K بفاصله x وبالزمن t ، وبالنسبة للجملة K' بالفاصله x' وبالزمن t' . وهدفنا إيجاد X' و t' عندما نعرف X و t .

إشارة ضوئية تسير على طول الاتجاه الموجب للمحور X وفقاً للمعادلة:

$$x = ct$$

$$(١) \quad x - ct = 0 \quad \text{أو}$$

وبما أن الإشارة الضوئية نفسها تسير بالنسبة لـ K' بالسرعة c أيضاً ، فإن لنا الصيغة المشابهة :

$$(٢) \quad x' - ct' = 0$$

أن هاتين النقطتين المكانيتين - الزمانيتين (الحادثين) اللتين تستجيبان لـ (C) أيضاً . ومن الواضح أن هذا يتحقق عندما تتحقق عموماً العلاقة :

$$(٣) \quad (x' - ct') = \lambda (x - ct)$$

حيث λ تمثل ثابتا ، لان (٣) تدل على ان انعدام $(x - ct)$ يؤدي الى انعدام $(x' - ct')$.

واذا كررنا المحاكمة نفسها على اشارة ضوئية تسير في الاتجاه السالب على المحور X ، نجد الشرط :

$$(4) \quad (x' + ct') = \mu(x + ct)$$

وبإضافة المعادلتين (٣) و (٤) طرفا الى طرف ، ثم بطرحهما طرفا من طرف ، وبإدخال الثابتين الآخرين a و b ، بدلا من λ و μ ، لاسباب تسهيلية ، حيث :

$$a = \frac{\lambda + \mu}{2}$$

$$b = \frac{\lambda - \mu}{2}$$

نحصل على المعادلتين :

$$(5) \quad \begin{cases} x' = ax - bct \\ ct' = act - bx \end{cases}$$

وبذلك سنجد حل مسألتنا اذا عرفنا الثابتين a و b . وهما ينتجان من المحاكمة التالية .

من اجل اصل (مركز) الجملة K' لدينا دوما $x' = 0$ ، وبذلك تعطينا اولى المعادلتين (5)

$$x = \frac{bc}{a}t.$$

واذا رمزنا V لسرعة اصل K' بالنسبة لـ K يكون لنا :

$$(6) \quad v = \frac{bc}{a}$$

ان نفس قيمة V يمكن ايجادها من المعادلتين (٥) اذا حسبنا سرعة نقطة اخرى من K' بالنسبة لـ K ، او سرعة نقطة من K بالنسبة لـ K' (وهي موجهة بالاتجاه السالب للمحور X) . وبموجز القول نستطيع ان نسمي V السرعة النسبية للجملتين .

وفوق ذلك ، يعلمنا مبدأ النسبية اننا لو نظرنا من K الى قضيب واحدة الطول الساكن في K' على طول المحور x' ، فسيكون طوله مساويا طول قضيب واحدة الطول الساكن على المحور K في X كما يبدو من K' . ولكي نرى كيف تظهر نقاط المحور x' منظورة من الجملة K يكفي ان نلتقط « صورة خاطفة » لـ K' من K ، وهذا يعني ان علينا ان نعطي قيمة خاصة لـ t (زمن K) ، ولتكن $t=0$. (١) . فمن اجل قيمة t هذه ، نجد من اولى المعادلتين (٥) :

$$x' = ax.$$

فالنقطتان ، من المحور x' ، المفصولتان المسافة $\Delta x' = I$ المقيسة في K' تبدوان على الصورة الخاطفة مفصولتين بالمسافة :

$$(٧) \quad \Delta x = \frac{I}{a}$$

ولكن لو التقطت الصورة الخاطفة من K' ($t'=0$) ، ولو اسقطنا t من بين المعادلتين (٥) ، واخذنا الصيغة (٦) بعين الاعتبار ، نجد :

$$x' = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) x.$$

ومن هنا نستنتج ان النقطتين من المحور X المفصولتين بالمسافة I (بالنسبة لـ K) ستمثلان على صورتنا الخاطفة بالمسافة :

$$(٧ ب) \quad \Delta x' = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)$$

لكن الصورتين الخاطفتين هما ، بموجب ما قلنا ، متماثلتان تماما ، وهذا يعني ان Δx الواردة في (٧) يجب ان تساوي $\Delta x'$ الواردة في (٧ ب) ، مما يعطي :

$$(٧ ج) \quad a^2 = \frac{I}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

(١) - لحظة التقاط الصورة الخاطفة (المترجم) .

ان المعادلتين (٦) و (٧ ج) تعينان الثابتين a, b . فاذا
 وضعنا قيمتي هذين الثابتين في (٥) نحصل على المعادلتين الاولى والرابعة
 الواردتين في الفصل ١١ ، اي :

$$(٨) \quad \left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned} \right\}$$

وهكذا حصلنا على تحويل لورنتس من اجل حادثين على المحور X ،
 وهو يستجيب للشرط :

$$(٨ ب) \quad x'^2 - c^2 t'^2 = x^2 - c^2 t^2$$

هذا وان تعميم هذه النتيجة كي تضم الحوادث التي تقع خارج المحور
 X يتم بالاحتفاظ بالمعادلتين (٨) مع العلاقتين الاضافيتين :

$$(٩) \quad \left. \begin{aligned} y' &= y \\ z' &= z \end{aligned} \right\}$$

وبذلك نستجيب لمسلمة ثبات سرعة الضوء في الخلاء بالنسبة للجهتين K
 و K' . معا ومهما كان منحى انتشاره . ويمكن ان نشب ذلك كما يلي .

نفترض اشارة ضوئية من نقطة اصل K في الزمن $t=0$. انها
 تنتشر وفق المعادلة :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = ct,$$

التي تعطي ، اذا ربعنا طرفيها :

$$(١٠) \quad x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0$$

ان قانون انتشار الضوء ، بالاضافة الى مسلمة النسبية ، يستلزم ان
 يتم هذا الانتشار - كما يحكم عليه من K' - وفق المساواة :

$$r' = ct',$$

او

$$(10 \text{ ب}) \quad x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0$$

ولكي تصبح المعادلة (10 ب) نتيجة للمعادلة (10) لا بد ان يكون :

$$(11) \quad x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = \sigma (x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2)$$

ولما كانت المعادلة (8 ب) يجب ان تصلح من اجل نقاط على المحور X . نجد $\sigma = 1$. فنرى بسهولة ان تحويل لورنتس يستجيب فعلا للمعادلة (11) من اجل $\sigma = 1$ ، لان (11) نتيجة لـ (8 ب) ولـ (9) وبالتالي لـ (8) و (9) . وبذلك نكون قد اوجدنا تحويل لورنتس .

ان تحويل لورنتس المتمثل بـ (8) و (9) مازال بحاجة الى تعميم . فمن الواضح ان لا اهمية لاختيار محاور K' موازية لمحاور K . وكذلك لا اهمية لكون سرعة K' الانسحابية بالنسبة لـ K تحدث في اتجاه المحور X . وبثأمل بسيط نرى اننا قادرون على بناء تحويل لورنتس ، في معناه العام ، من نوعين من التحويلات هما : تحويل لورنتس في صيغته الخاصة ، وتحويل مكاني - يستهدف ابدال الاحداثيات المتعامدة بجملة احداثيات اخرى تذهب محاورها في منح اخرى .

واخيرا يمكن ان نعرف رياضيا تحويل لورنتس العام كما يلي :
انه يعطي صيغ x' و y' و z' و t' كتتابع خطية متجانسة
اذا x, y, z, t بحيث تستجيب هذه المقادير للمطابقة :

$$(11 \text{ ب}) \quad x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$$

اي اننا اذا بدلنا x, y, z, t في الطرف الايسر منها بتتابع التحويل العام نحصل على طرفها الايمن .



الملحق ((٢)) فضاء منكوفسكي ذو الابعاد الاربعة ((العالم))

((اضافة للفصل ١٧))

يمكن ان نصوغ تحويل لورنتس بشكل ابسط اذا ادخلنا المقدار التخيلي $\sqrt{-1} \cdot ct$ كمتحول زماني بدلا من t . فاذا ادخلنا طبقا لذلك :

$$\begin{aligned}x_1 &= x \\x_2 &= y \\x_3 &= z \\x_4 &= \sqrt{-1} \cdot ct\end{aligned}$$

وكذلك الامر من اجل الجملة K' ، فان شرط التطابق الذي يستجيب له تحويل لورنتس يصبح :

$$(12) \quad x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 + x_4'^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2$$

تلك هي صيغة المطابقة (١١ ب) لدى استعمال « الاحداثيات » الجديدة . ونرى ، في (١٢) ان الاحداثي التخيلي الزمني x_4 يدخل في شرط التحول كما تدخل الاحداثيات المكانية x_1, x_2, x_3, x_4 . وهذا ناجم ، طبقا لنظرية النسبية ، عن واقع ان « الزمن » x_4 يدخل في القوانين الطبيعية كما تدخل المتحولات المكانية x_1, x_2, x_3 .

ان المتصل ذا الابعاد الاربعة المعروف بـ « الاحداثيات » x_1, x_2, x_3, x_4 سماه منكوفسكي « العالم » ، كما اطلق على « النقطة - الحادث » اسم « نقطة العالم » . فبعد ان كانت الفيزياء « حوادث » في الفضاء ذي الابعاد الثلاثة عادت ، كما كانت ، « وجودا » في « عالم » رباعي الابعاد .

ان « العالم » الرباعي الابعاد يماثل جيدا « الفضاء » الثلاثي الابعاد للهندسة التحليلية (الاقليدية) . فاذا ادخلنا في هذه الهندسة جملة احداثيات ديكارتية جديدة x'_1, x'_2, x'_3 تنطلق من نقطة الاصل نفسها ، فان x'_1, x'_2, x'_3 هي توابع خطية متجانسة لـ x_1, x_2, x_3 تستجيب للمعادلة :

$$x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2.$$

ذات التشابه الاصح مع (١٢) . نستطيع اذن ان نتخذ شكليا « عالم منكوفسكي » كفضاء اقليدي رباعي الابعاد (مع احداثي زمني تخيلي) ، وعندئذ يعبر « تحويل لورنتس » عن « دوران » جملة الاحداثيات في « العالم » ذي الابعاد الاربعة .



الملحق (٣)

الاثبات التجريبي لنظرية النسبية العامة

نستطيع من الناحية النظرية المنهجية ، ان نتصور آلية تطور العلم التجريبي كعملية استقراء مستمرة . فالنظريات تستولد وتضاعف في اطر ضيقة كمقولات عن عدد كبير من الملاحظات بشكل قوانين تجريبية يمكن ان توضع القوانين العامة على محكها . وفي هذا الاسلوب يبدو تطور العلم ذا شبه بعملية تجميع جدول مصنف . فهو بذلك محاولة اختبارية بحثية .

لكن هذه النظرة لا تشمل بآية صورة مجمل التطور الفعلي ، لانه يرتبط بالدور الهام الذي يلعبه الحدس والفكر الاستنتاجي في تطور العلوم الدقيقة . وفي الوقت الذي يشهد بروز علم من مراحل الاولى ، لا يتم انجاز التقدم النظري عن طريق عملية احكام بحثية . فالباحث يفضل ان يسعى ، مستهديا بخبرته التجريبية ، الى تنمية منظومة من الافكار يستخدم عموما المنطق في بنائها من عدد صغير من الافتراضات الاساسية التي تسمى مسلمات . ونطلق على مجموعة الافكار التي من هذا النوع اسم نظرية . فالنظرية تجد مسوغ وجودها في واقع انها تربط فيما بين عدد كبير من الارصاد ، وفي هذه الناحية بالذات تكمن « حقيقة » النظرية .

هذا ويمكن ان توجد عدة نظريات (تتعلق بمجموعة واحدة من المعطيات التجريبية وتختلف فيما بينها اختلافا بينا . بيد انها فيما يخص النتائج التي يمكن ان تقود اليها ، قد يكون الاتفاق فيما بين النظريات تاما لدرجة يصعب معها ان نجد اي استنتاج تختلف فيه نظريتان . وكمثال على ذلك نشير الى ما هو معروف في علم البيولوجيا ، في نظرية داروين DARWIN في تطور الانواع بالاصطفاء من خلال الصراع على البقاء ، وفي نظرية التطور المستندة

الى فرضية انتقال الصفات المكتسبة عبر الوراثة . ولدينا نموذج آخر للاتفاق الجيد بين نتائج نظريتين هما ميكانيك نيوتن من جهة ونظرية النسبية العامة من جهة اخرى . وهذا الاتفاق يصل لدرجة اننا لم نتمكن حتى اليوم من العثور الا على بضع نتائج من نظرية النسبية العامة نستطيع تحريكها ولم يمكن استنتاجها من فيزياء ما قبل النسبية ، وذلك رغم الفرق العميق في الافتراضات الاساسية بين النظريتين . وسنفحص مرة اخرى فيما يلي هذه النتائج الهامة كما سنناقش البنية التجريبية المنتمية لكليهما والتي حصلنا عليها حتى الآن .

أ - حركة حضيض فلك عطارد

يدل ميكانيك نيوتن وقانونه في التماثل على ان الكوكب السيار حول الشمس لا بد ان يرسم اهليجا حولها ، او ، بتعبير ادق ، حول مركز ثقل الشمس والكوكب . وفي مثل هذه المنظومة تحتل الشمس ، او مركز الثقل المشترك ، احد محوري المدار الاهليجي بحيث تتزايد المسافة في السنة الكوكبية الواحدة ، بين الشمس والكوكب من قيمة صفرى الى قيمة عظمى ثم تعود فتتناقص الى القيمة الصفرى وهكذا . لكننا اذا ادخلنا في الحساب ، بدلا من قانون نيوتن ، قانون تجاذب يختلف عنه قليلا فسنجد ، بموجب هذا القانون الجديد ، ان الحركة تظل متسمة بالتغير الدوري للمسافة بين الشمس والكوكب لكن الزاوية التي يمسحها المستقيم الواصل بينهما اثناء هذا الدور (حضيض - الموقع (لاقرب) الى الشمس - الى حضيض) ستختلف عن ٥٣٦° . اي ان خط المدار لن يكون مغلقا على نفسه بل سيملأ حيزا حلقيًا من مستوي المدار ، وهو الحيز الحلقي المحصور بين دائرة الحضيض (نصف قطرها المسافة بين الشمس والحضيض) وبين دائرة الاوج (ابعد نقطة ، من المدار ، عن الشمس) .

وبموجب نظرية النسبية العامة ، وهي تختلف طبعا عن نظرية نيوتن ، يجب ان تختلف حركة الكوكب في مداره عن حركة نيوتن - كبلر بفرق يتمثل

بأن الزاوية التي يمسحها المستقيم الواصل بين الشمس والكوكب ، من حضيض الى الذي يليه ، تزيد عن دورة كاملة واحدة بمقدار يساوي :

$$+ \frac{24\pi^3 a^2}{T^2 c^2 (1 - e^2)}$$

(ان الدورة الكاملة الواحدة تقابل زاوية تساوي 2π راديان ، وهذه الصيغة تعطي الزيادة الزاوية - عن 2π - التي يمسحها المستقيم شمس - كوكب اثناء الفاصل الزمني بين حضيضين متواليين) وتمثل a في هذه الصيغة نصف القطر الكبير للاهليج ، وتمثل e تباعده المركزي ، و c سرعة الضوء و T زمن الدورة الواحدة الكاملة . يمكن ايضا ان ننص على هذه النتيجة بما يلي : بموجب نظرية النسبية العامة ، يدور المحور الكبير للاهليج حول الشمس بنفس جهة دوران الكوكب في مداره . ويدل الحساب على ان سرعة هذا الدوران يجب ان تكون 43 ثانية قوسية في القرن الزمني من اجل الكوكب عطارد ، اما من اجل الكواكب الاخرى في منظومتنا الشمسية فان هذه السرعة صغيرة لدرجة يكاد يتعذر كشفها (١) .

وواقع الامر ان الفلكيين ايقنوا ان نظرية نيوتن لا تكفي لحساب حركة عطارد المرصودة بالدقة التي بلغتها اليوم عمليات الرصد الفلكي . فهم بعد ان حسبوا حساب كل التأثيرات المخطة بحركة عطارد ، وجدوا (لوفرييه LEVERRIER - 1859 - ونيوكمب NEWCOMB - 1895) انه ما يزال لديهم حركة حضيضية لمدار عطارد لم يتمكنوا من تحليلها ، وسرعة هذه الحركة لا تختلف بفرق محسوس عن 43 ثانية قوسية في القرن . فهذا الفرق لا يتجاوز بضع ثوان فقط .

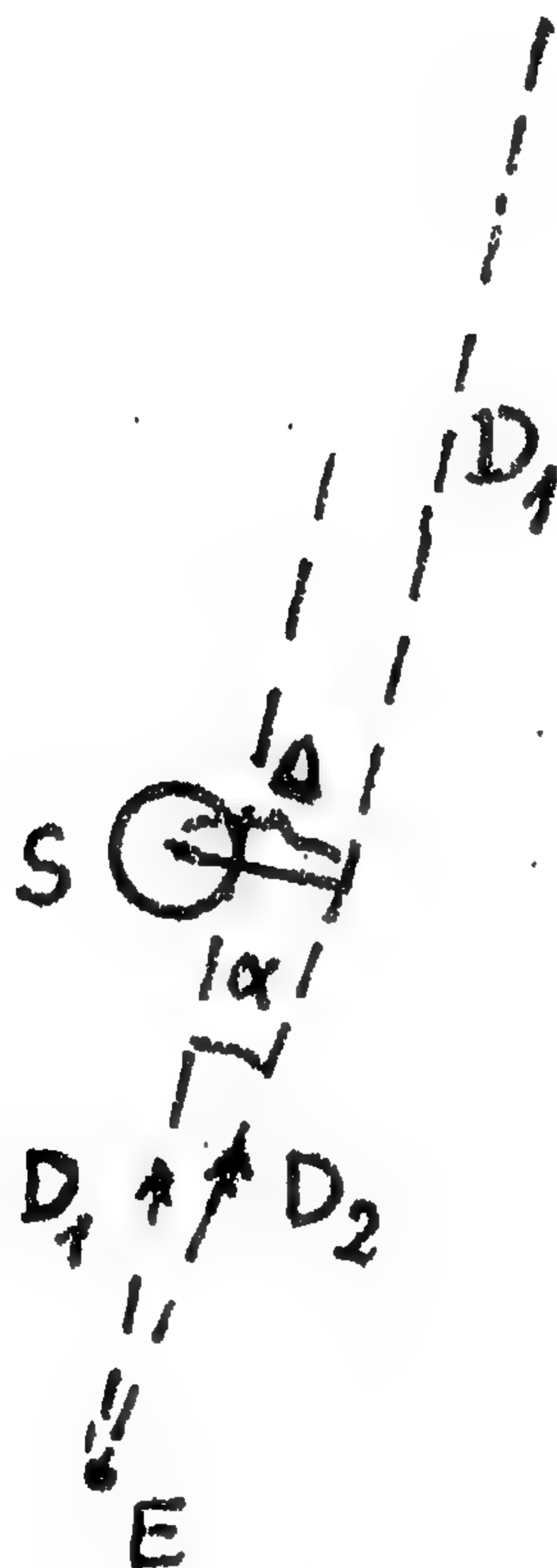
ب - انعطاف الضوء بفعل الحقل الثقالي

لقد ذكرنا في الفصل (٢٢) ان الشعاع الضوئي يعاني ، طبقا لنظرية النسبية العامة ، انعطافا في مساره عندما يخترق حقلًا ثقاليًا ، وهو انحناء يشبه

(١) - وخصوصا في مدار كوكب الزهرة : فهو دائري جدا ، مما يتعذر معه تعيين نقطة حضيضه بدقة .

الانحناء الذي يعانيه جسم مادي مكدوف عبر حقل ثقالي . وتتوقع النظرية ان الشعاع الضوئي الذي يمر بالقرب من كتلة مادية ثقيلة ينحطف نحوها . ومن اجل شعاع يمر مساره قرب الشمس وعلى مسافة قطرية من مركزها تساوي Δ ، تدل النظرية ان زاوية هذا الانعطاف تساوي (شكل ٥) .

$$\alpha = \frac{1.7 \text{ ثانية قوسية}}{\Delta}$$



الشكل رقم ٥ -

ويمكن ان نضيف بموجب النظرية ، ان نصف هذا الانعطاف α ناجم عن حقل الجاذبية النيوتني للشمس والنصف الآخر عن الاختلال الهندسي (الانحناء) الذي تولده الشمس في الفضاء القريب منها .

يمكن ان نضع هذه النتيجة على محك القياس بتصوير النجوم اثناء كسوف كلي للشمس . والسبب الوحيد الذي يجعلنا ننتظر كسوفاً كلياً يعود الى ان الجو الشمسي، في غير هذه الظروف ، مضاء لدرجة عالية تجعل النجوم الواقعة قرب قرص الشمس غير مرئية . ان هذه الظاهرة المتوقعة يمكن ان تفهم تماماً في مخطط الشكل (5) . فلولا وجود الشمس S لرأينا النجم ، وهو على مسافة لا متناهية عملياً ، من الارض E في المنحى D_1 . لكننا ، بسبب انعطاف الضوء الآتي من النجم قرب الشمس ، نرى النجم في المنحى D_2 ، اي في مكان ابعد قليلاً ، عن حافة قرص الشمس ، من مكانه الحقيقي .

اما عملياً فقد تم الرصد بالشكل التالي . لقد جرى تصوير النجوم القريبة من حافة الشمس اثناء كسوف كلي . ثم جرى تصوير ثان للنجوم نفسها عندما اصبحت الشمس في موضع آخر من السماء ، اي بعد (او قبل) بضعة شهور . ولدى مقارنة الصورتين يجب ان تظهر مواقع النجوم ابعد عن الشمس في الصورة الكسوفية مما هي في الصورة الاخرى بفرق يتعلق بالزاوية α :

نحن مدينون للجمعية الملكية وللجمعية الفلكية الملكية بتحري هذه النتيجة الهامة . فدون ان تعبت بالحرب ولا بالمصاعب المادية والنفسية الناجمة عنها ، جهزتا بعثتين - الى سوبرال (البرازيل) والى جزيرة برنسيب (افريقيا الغربية) - وارسلتا عدداً من مشاهير الفلكيين (ادينغتون EDDINGTON وكوتنغهام COTTINGHAM وكروملين CROMMLIN ودافيدسون DAVIDSON) للحصول على صور لكسوف ٢٩ أيار ١٩١٩ . كان الاختلاف النسبي المتوقع بين الصورة الكسوفية والاخرى من رتبة اجزاء من الف جزء من المليمتر فقط . تلك هي الدقة العظيمة التي يجب الحصول عليها لدى اجراءات التقاط الصور ولدى اجراء القياسات عليها .

اتت نتائج القياس مؤكدة للنظرية بشكل مرض . ونورد في الجدول التالي المركبتين المتعامدتين للانحرافات عن الشمس المحصول عليها بالرصد وتلك المحسوبة طبقاً لنظرية النسبية العامة (بالثواني القوسية) .

رقم النجم	الاحداثي الاول		الاحداثي الثاني	
	المربود	المربوب	المربود	المربوب
11 . .	-0.19	-0.22	+0.16	+0.02
5 . .	+0.29	+0.31	-0.46	-0.43
4 . .	+0.11	+0.10	+0.83	+0.74
3 . .	+0.20	+0.12	+1.00	+0.87
6 . .	+0.10	+0.04	+0.57	+0.40
10 . .	-0.08	+0.09	+0.35	+0.32
2 . .	+0.95	+0.85	-0.27	-0.09

ج - انزياح الخيوط الطيفية نحو الاحمر

لقد بينا في الفصل (٢٣) ان الميقاتيات المتماثلة الضنع المربوطة بجملة K' دوارة بالنسبة للجملة الغاليلية K ، والتي تعتبر ساكنة بالنسبة للجملة الدوارة ، تعمل بمعدلات متفاوتة بتفاوت اماكنها . نفحص الآن هذه القضية كميًا . ان الميقاتية الموضوعة على المسافة r من مركز القرص الدوار تتحرك بالنسبة لـ K ، بالسرعة :

$$v = \omega r ,$$

حيث تمثل ω سرعة الدوران الزاوية لـ K' بالنسبة لـ K . فاذا رمزنا بـ γ لعدد دقات الميقاتية في واحدة الزمن (معدل الميقاتية) بالنسبة لـ K عندما تكون الميقاتية ساكنة ، ورمزنا بـ (γ') لمعدلها وهي تدور بالنسبة لـ K بالسرعة v ، ولكنها ساكنة بالنسبة للقرص K' ، كان لنا وفق ما قلناه في الفصل (١٢) :

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right) \quad \text{أو ، بدقة كافية :}$$

وهذه الصيغة يمكن وضعها بالشكل التالي :

$$\nu = \nu_0 \left(1 - \frac{1}{c^2} \frac{\omega^2 r^2}{2} \right)$$

وإذا رمزنا ب Φ لفرق كمون القوة النابذة بين الميقاتية ومركز القرص ، أي للعمل المعتبر سالبا والذي نصرفه على واحدة الكتلة ، ضد القوة النابذة ، كي ننقلها من مكان الميقاتية الى مركز القرص ، نجد :

$$\Phi = - \frac{\omega^2 r^2}{2}$$

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{\Phi}{c^2} \right) \quad \text{ومن ذلك ينتج ان :}$$

وإول ما نراه من هذه الصيغة ان الميقاتيتين المتماثلتي الصنع تعملان بمعدلين مختلفين إذا وضعتا على مسافتين مختلفتين من مركز القرص . ان هذه النتيجة تنسحب أيضا على الراصد الدائر مع القرص .

ان الراصد الموجود على القرص يشعر انه في حقل ثقالي ذي كمون Φ ، وبذلك تكون النتيجة التي حصلنا عليها صحيحة تماما في حقول الثقائل . ونحن ، فوق ذلك ، نستطيع ان نعتبر الذرة المادية ، التي تصدر خيوطا طيفية ، ميقاتية ذرية مما يحدو بنا لاصدار المقولة التالية :

ان الذرة تمتص او تصدر ضوءا ذا تواتر يتوقف على كمون الحقل الثقالي الذي يحويها .

فتواتر الذرة الموجودة على سطح جرم سماوي سيكون اقل قليلا من تواتر الذرة الموجودة في الفضاء الحر (او على سطح جرم سماوي اصغر) . لكن $\phi = - K \frac{M}{r}$ ، حيث K ثابت نيوتن الثقالي و M كتلة الجرم

السمائي . وبذلك لا بد من حدوث انزياح نحو الاحمر للخيوط الطيفية الصادرة عن سطح النجوم عندما تقارن هذه الخيوط بتلك التي تصدر عن العنصر الكيميائي نفسه وهو موجود على سطح ارضنا ، وقيمة هذا الانزياح تساوي :

$$\frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} = \frac{K M}{c^2 r}$$

ان هذا الانزياح نحو الاحمر ، كما تتنبأ به نظرية النسبية من اجل الشمس ، يبلغ تقريبا جزئين من مليون جزء من طول الموجة . لكننا لا نستطيع اجراء حساب مضبوط لهذه الظاهرة على سطوح نجوم اخرى لاننا نجهل عموما كتلتها وانصاف اقطارها .

ان قضية وجود هذا المفعول ما تزال مسألة مطروحة . ويسعى الفلكيون اليوم (١٩٢٠) بجهد دؤوب احسم هذا الامر . فبسبب صغر هذا الانزياح في حالة الشمس ، يصعب اتخاذ موقف حول وجوده . على ان غريبه GREBE وباشم BACHEM (في بون) ، بنتيجة قياساتهما وقياسات ايفرشيد EVERSHED وشفارتشيلد SCHWARZSCHILD ، يضعون وجود هذا الانزياح خارج دائرة الشك تقريبا ، بينما يصل باحثون آخرون ، وخصوصا سانت جون ST JOHN ، الى رأي معاكس بنتيجة قياساتهم .

ان انزياحات وسطية نحو حد اقل من المتوقع قد اكتشفت بصورة اكدية في التحريات الاحصائية للنجوم الثابتة . لكن فحص النتائج التجريبية ، الحاصلة حتى اليوم ، لا تسمح باتخاذ قرار حاسم حول ما اذا كان بالامكان ام لا ، عزو هذه الانزياحات الى فعل الثقائل . بيد ان النتائج التجريبية قد جمعت معنا ونوقشت بالتفصيل ، من وجهة النظر التي تهمننا هنا في مقالة علمية نشرها فرويندليشن FRUNDLICH عنوانها « نحو البرهان على نظرية النسبية العامة » في المجلة الالمانية « علوم الطبيعة » (العدد ٣٥ ، الصفحة ٥٢٠ ، عام ١٩١٩ ، الناشر : بوليوس سبرنجر ، برلين) .

وعلى كل حال فان قرارا حاسما سيتخذ خلال السنوات القليلة القادمة ،
فاذا كان الحقل التثاقلي لا يولد انزياحا للخيوط الطيفية نحو الاحمر فان
نظرية النسبية العامة ستصبح في مأزق صعب . اما اذا ثبت ان سبب انزياح
الخيوط الطيفية هو الكمون التثاقلي ، فان دراسة هذا الانزياح ستوفر وسيلة
هامة للحصول على معلومات عن كتل الاجرام السماوية .

ذيل (٢) : ان انزياح الخيوط الطيفية نحو الاحمر قد تأكد نهائيا لدى
آدامز عام ١٩٢٤ ، نتيجة ارصاده لمرافق الجرم سيريوس الذي تبلغ شدة هذا
المفعول على سطحه عشر مرات من شدته على سطح الشمس . (المترجم الانكليزي) .

ذيل (ب) : لقد تأكد هذا الانزياح ايضا في تجارب أرضية مخبرية من
خلال ما يسمى مفعول موسباور **MOSSBAUER** الذي اخترع طريقة
دقيقة جدا لقياس مثل هذه الانزياحات الضئيلة عام ١٩٦٠ (المترجم) .

* * *

الملحق ((٤))

بنية الفضاء بموجب نظرية النسبية العامة

((اضافة للفصل ٣٢))

منذ نشر الطبعة الاولى لهذا الكتاب الصغير اكتسبت معرفتنا بالفضاء الكوني (المسألة الكونية) تطورا هاما لا بد من ذكره حتى في العرض المبسط للموضوع .

ان محاكماتي كانت في البدء تستند الى فرضيتين :

١ - يوجد ، في الفضاء الكوني ، كثافة وسطية للمادة ، واحدة في كل مكان وغير معدومة .

٢ - ان حجم (نصف قطر) الفضاء مستقل عن الزمن .

لقد ثبت صحة هاتين الفرضيتين ، طبقا لنظرية النسبية ، لكن فقط بعد ان اضيف الى معادلات الحقل حد افتراضي لم تكن تستلزمه النظرية بحد ذاتها ولم يكن يبدو طبيعيا من الناحية النظرية (الحد الكوني لمعادلات الحقل) .

لقد بدت لي الفرضية الثانية في ذلك الوقت امرا لا مناص منه ، لانني ظننت ان سبيل المحاكمات بدونها مسدود .

لكن الرياضي الروسي فريدمان FRIEDMAN قد برهن ، خلال العشرينات ، على ان فرضية اخرى يعقل ان توجد ، من الناحية النظرية .

فقد اثبت ان من الممكن الاحتفاظ بالفرضية الاولى دون ادخال الحد الكوني الاقل معقولة ، في معادلات الحقل التثاقلي اذا رغبتنا في اسقاط الفرضية الثانية . وبالتدقيق يمكن لمعادلات الحقل ان تقبل حلا يكون فيه « نصف قطر العالم »

متعلقا بالزمن (الفضاء المتوسع) . وبهذا المعنى يمكن للمرء ان يقول مع فريدمان ان النظرية تقتضي توسع الفضاء .

وبعد سنوات قليلة اثبت (هوبل) HUBBLE ، من خلال تحريات خاصة في السدم الخارجية عن المجرات (دروب التبانة) ، ان الخيوط الطيفية الصادرة عنها متزاخة نحو الاحمر بمقدار يتناسب مباشرة مع بعد السديم عنا . ان هذه الظاهرة يمكن ان تفسر حصرا ، في حدود معلوماتنا الحالية وبموجب مفعول دوبلر ، بحركة ابتعاد لمجموعة النجوم في الفضاء (١) - كما تتطلب ، في رأي فريدمان ، معادلات الحقل التافلي . فاكشاف هوبل هذا يمكن ان يتخذ ، الى حد ما ، دليلا على صحة النظرية .

على ان مشكلة اخرى تبرز عندئذ . فتفسير الانزياح الطيفي للمجرات الذي اتخذه هوبل دليلا على التوسع (والذي لا يمكن بسهولة الشك فيه من الناحية النظرية) يقود بالحساب الى ان بدء العالم قد حدث منذ مليار سنة « فقط » ، بينما يشير علم الفلك الفيزيائي الى ان نمو النجوم المفردة ومجموعات النجوم قد حصل قبل ذلك بكثير . وما من وسيلة معروفة حتى اليوم تتيح الخروج من هذا التعارض .

اود اخيرا ان الفت النظر الى ان نظرية توسع الفضاء ، بالاضافة الى المعطيات الفلكية التجريبية ، لا تتيح ان نقول كلمة الفصل في خاصية الفضاء (الثلاثي الابعاد) ، منته ام لا منته ، بينما تقود الفرضية « السكونية » البدئية الى انفلاقه على نفسه (محدوديته) .



(١) ان هذه الظاهرة مؤكدة اليوم يقينا وتعرف باسم « توسع العالم الكوني » بسبب « هروب المجرات » (المترجم) .

الملحق (٥)

النسبية ومسألة المكان (١)

ان ما يميز فيزياء نيوتن انها تمنح كلا من المكان والزمان وجودا حقيقيا بحد ذاته كما هي المادة ، لان فكرة التسارع تظهر في قانون الحركة النيوتني . لكن التسارع ، في هذه النظرية ، يشير حصرا الى « التسارع بالنسبة للفضاء » . ففضاء نيوتن يجب ان يفهم على انه « في سكون » ، او على الاقل « غير متسارع » ، كي يتمكن المرء من اعتبار التسارع ، الذي يرد في قانون الحركة ، كمقدار بكل معاني الكلمة . وكذلك الامر مع الزمن ، فهو بالطبع يدخل بالصورة نفسها في مفهوم التسارع . وقد شعر نيوتن نفسه واكثر معاصريه النقاد بالقلق من اضطرار المرء لالصاق حقيقة فيزيائية بالمكان نفسه كما بحالة الحركة على حد سواء . بيد انه لم يكن للمرء في ذلك الوقت خيار آخر ، اذا رغب في ايجاد معنى واضح لعلم الميكانيك .

والواقع ان الصاق حقيقة فيزيائية بالمكان عموما كان ضرورة ملحة وخصوصا بالمكان الخالي . واليوم ومنذ عصور قديمة يقاوم الفلاسفة هذا الادعاء . وقد احتج ديكارت بقول من هذا القبيل : ان المكان مرادف للامتداد لكن الامتداد ملازم للأجسام ، وبذلك لا يوجد مكان بدون اجسام ولا يوجد بالتالي مكان خال . ان نقطة الضعف في هذه الحجة تكمن اوليا فيما يلي .

(١) - كما في الترجمة الاولى لهذا الكتاب عام ١٩٢٠ ، فقد عاد صديقي القديم استاذ

الشرف س. د. ملنر MILNER وافادني من خبرته الفريدة في هذا المجال ، وذلك بقراءة ترجمة هذا الملحق وبتقديم العديد من الاقتراحات للتصحيح . كما انني ادين له وللاستاذ

أ. ج. ووكر A. G. WALKER استاذ الرياضيات في جامعة ليفربول ، الذي قرأ هذا الملحق وقدم اقتراحات شتى مفيدة (المترجم الانكليزي) .

صحيح بالتأكيد ان مفهوم الامتداد ينبع من خبرتنا في انفصال الاجسام وفي تلامسها . لكننا لا نستطيع ان نستنتج من هذا ان مفهوم الامتداد لا يمكن ان يكون له ما يسوغه في الحالات التي لا تؤدي بحد ذاتها الى نشوء هذا المفهوم . ان مثل هذا التعميم للمفاهيم يمكن ان تسوغه بصورة لا مباشرة فائدته في فهم النتائج العملية . فالقول بأن الامتداد يقتصر على الاجسام هو بحد ذاته ادعاء لا اساس له بالتأكيد . وعلى كل حال سنرى فيما بعد ان نظرية النسبية العامة تؤكد رأي ديكارت عن طريق غير مباشر . فالذي جلبه ديكارت الى وجهة نظره الرائعة كان حتما احساسه بأن المرء غير ملزم ، لولا احكام الضرورة ، بالصاق الحقيقة بشيء مثل المكان لا يمكن ان يكون له وجود « مجرب مباشرة » .

ان الاصل النفساني لفكرة المكان ، او للضرورة اليها ، بعيد عن ان يكون واضحا بالشكل الذي يظهر فيه من خلال طريقتنا المعتادة في التفكير . فعلماء الهندسة القدماء يتعاملون مع اشياء تصورية (خط مستقيم ، نقطة ، سطح) ، لا مع فضاء بحد ذاته كما صنعته الهندسة التحليلية فيما بعد . ان فكرة المكان هي على كل حال ، مستوحاة من خبرات اولية . لنفترض ان صندوقا قد صنع . ان الاشياء يمكن ان تترتب داخل الصندوق بطريقة ما ، بحيث يصبح مليئا . ان امكانية مثل هذا الترتيب هو خاصية من خواص الغرض المادي « الصندوق » ، هو شيء معطى مع الصندوق ، هو « المكان المحاط » بالصندوق . ان هذا شيء يختلف باختلاف الصناديق ، شيء مصور في الفكر بصورة طبيعية تماما ككائن مستقل عما اذا كان ام لم يكن بتاتا ، في اي وقت ، شيء في الصندوق . فاذا لم يوجد اي شيء في الصندوق فان مكانه (١) يبدو كونا « خاليا » .

في هذه الحدود يظهر مفهومنا للمكان مرتبطا بالصندوق . وينتج منه ، على كل حال ، ان امكانيات التخزين التي يوفرها الصندوق - المكان لا تتوقف

(١) - قد يكون من المفيد ان نذكر القاريء ، بمناسبة هذا المثال (وهذا الملحق عموما) ، ان الكلمة العربية ، مكان ، مشتقة من فعل الكون كاسم ظرفي موضعي . ف « المكان » هو في الاصل المجرد « ظرف الكون » الموضعي (المترجم) .

على ثخن جذران الصندوق . الا يمكن لهذا الثخن ان ينعدم دون ان نخسر مفهوم « المكان » من جراء ذلك ؟ ان هذا التصور الحدي عملية مشروعة طبعا ، وعندئذ سيبقى المكان في الدهن دون الصندوق ، كشيء واضح بنفسه ، بالرغم من انه يفقد حقيقته اذا نسينا اصل مفهومه . ويمكن للمرء ان يتفهم اشمئزاز ديكارت من اعتبار المكان شيئا مستقلا عن الاغراض المادية ، شيئا يمكن ان يوجد دون المادة (١) . (لكن هذا لم يمنعه ، في الوقت نفسه ، من ان يعامل الفضاء كمفهوم اساسي في هندسته التحليلية) . هذا وان تركيز الانتباه على الخلاء في ميزان الضغط الزئبقي من شأنه ان يفهم آخر الديكارتيين . ولكن يجب ان لا ننكر ، حتى في هذه المرحلة الابتدائية ، ان شيئا غير مرض ما يزال يشوب مفهوم المكان ، او المكان المعتبر شيئا مستقلا حقيقيا .

ان الاساليب التي يمكن بها صر الاجسام في المكان (في الصندوق مثلا) هي هدف الهندسة الاقليدية في الابعاد الثلاثة وذات البنية المسلمانية التي خلصتنا في نسيان انها تختص في امور قابلة للتحقيق .

والآن اذا استخرجنا مفهوم المكان بالاسلوب المعروف اعلاه والذي ينبع من الخبرة في « املء » الصندوق ، فان هذا المكان هو قبل كل شيء فضاء محدود . وهذه المحدودية لا تبدو ، على كل حال ، اساسية لاننا يمكن دوما ان نفكر بصندوق اكبر كي يحتوي الصندوق الاصغر . وبهذه الوسيلة يبدو المكان شيئا لا محدود .

انني لن اتعرض هنا للكيفية التي يمكن بها ان نتقصى مفاهيم الابعاد الثلاثة والسمة الاقليدية للمكان . لكنني سأهتم ، بالاحرى وقبل كل شيء ومن وجهات نظر اخرى ، بالدور الذي لعبه مفهوم المكان في تطور الفكر الفيزيائي .

(١) - ان محاولة كانت KANT للخروج من هذا المأزق بانكار موضوعية المكان

يضعه حتما ان نركن اليه ، لان امكانيات ضر متلاصقة داخل فضاء الصندوق امور فيها من الموضوعية ما في الصندوق نفسه وما في الاغراض الضرورية ضمنه .

عندما يوضع صندوق صغير S ، ساكن نسبيا ، ضمن المكان الجوي لصندوق كبير S . فان المكان الجوي لـ (S) هو جزء من المكان الجوي لـ (S) ، كما ان « المكان » نفسه الذي يحوي كليهما ينتمي الى كل منهما . وعندما يكون S متحركا بالنسبة لـ S : فان مفهوم المكان يصبح اقل بساطة . اذ ينزع المرء عندئذ الى التفكير بأن S لا يستوعب دوما نفس المكان ، ولكن جزءا متغيرا من مكان S . يصبح من الضروري ، والحالة هذه ، ان نوزع على كل صندوق مكانه الخاص ، لا على اعتبار انه محدود ، وان نعتبر هذين المكانين في حالة حركة ، واحدا بالنسبة للآخر .

قبل ان ينتبه المرء لهذا التعقيد ، كان المكان يبدو حيزا لا محدودا ، او حاويا تتجول فيه الافتراض المادية . لكن علينا الآن ان لا ننسى انه يوجد عدد لا متناه من الامكنة التي تتحرك بعضها بالنسبة لبعض . فمفهوم المكان ، ككائن موجود موضوعيا ومستقل عن الاشياء ، ينتمي الى الفكر قبل - العلمي ، لكن الامر ليس كذلك بخصوص فكرة وجود عدد لا متناه من الامكنة المتحركة بعضها بالنسبة لبعض . فالفكرة الثانية حتم منطقي بالفعل ، لكنها بعيدة عن ان تلعب دورا كبيرا في الفكر العلمي .

ولكن ماذا يمكن ان نقول بخصوص الاصل النفساني لمفهوم الزمن ؟ ان هذا المفهوم مرتبط دون شك بواقع « عملية الاستدكار » ، وكذلك بالتفريق بين المعاناة المحسوسة وبين تذكرها . ومن المشكوك فيه ان يكون هذا التفريق بين المعاناة المحسوسة (او مجرد اعادة تمثيلها) وبين تذكرها ، بحد ذاته موهبة نفسانية مباشرة . فكل امرئ قد تعرض لان يشك فيما اذا كان شيء قد وقع له بالفعل ام انه كان مجرد حلم . ومن المحتمل ان تكون القدرة على التمييز بين هذين الاختيارين تأتي اولا كنتيجة لنشاط ذهني مرتب مبدع .

ان الخبرة مرتبطة بـ « الاستدكار » ، وهي تعتبر شيئا « أبكر » زمنيا من « المعاناة الراهنة » . وهذا مبدأ تربيسي ادراكي في مجال الخبرات المستدكرة .

وان حصول الانسجام معه يولد المفهوم اللدائي للزمن ، اي مفهوم الزمن بالاعتماد على ترتيب الاحداث التي يعاينها الفرد .

فماذا نعني بجعل مفهوم الزمن موضوعيا . لنفحص مثالا . انسان A (انا) يعاني التجربة « انبثق النور » . وفي الوقت نفسه يختبر A ايضا سلوكا للانسان B من خلال العلاقة بين خبرته الخاصة « انبثق النور » وسلوك B . وبذلك يحدث ان A يربط مع B التجربة « انبثق النور » . ففي ذهن A تتولد فكرة اناسا آخرين يساهمون ايضا في التجربة « انبثق النور » . فتجربة « انبثق النور » لم تعد تفسر حصرا كتجربة شخصية ، بل كتجربة مع اناس آخرين (او ، عند الاقتضاء فقط ، « خبرة كامنة ») . وعن هذا الطريق يتولد التفسير بان « انبثق النور » التي دخلت في الوعي ، بادىء الامر ، ك « تجربة — معاناة » ، تفسر الآن ايضا ك « حادث » (موضوعي) . فالمجموع الاجمالي لكل الحوادث هو بالضبط ما نعنيه عندما نتكلم عن « العالم الحقيقي الخارجي » .

لقد راينا اننا نشعر بانفسنا مدعوين الى تدمير الترتيب الزمني لتجاربنا وفق الاساس التالي . اذا كان (ج) متأخرا عن ب وكان هـ متأخرا عن ج ، فان هـ يكون متأخرا ايضا عن ب (تسلسل التجارب) . والآن ما هو ، في هذا التسلسل ، موضع « الحوادث » التي ربطناها بالتجارب ؟ فلو هله الاولى يبدو بديهيا ان نعتبر ان الترتيب الزمني للحوادث موجود وهو يتفق مع الترتيب الزمني للتجارب . ذلك هو الوضع الذي كان قائما ، عموما وبدون شعور ، حتى بدأت الشكوك فيه تطل برأسها (١) . ولكي نتوصل الى فكرة عالم موضوعي ما نزال بحاجة الى مفهوم بناء اضافي . فالحوادث لا يقع فقط في الزمان بل وفي المكان ايضا .

لقد حاولنا حتى الآن ان نشرح كيف يمكن نفسانيا استخراج مفاهيم

(١) — ان ترتيب الحوادث الزمني المحصول عليه ، مثلا ، بوسائل صوتية يمكن ان يختلف عن لترتيب الزمني المحصول عليه بالرؤية ، وبذلك لا يمكن ان نعتبر ببساطة التسلسل الزمني للحوادث منطبقا على التسلسل الزمني للتجارب .

المكان والزمان والجاذب من خلال علاقتها بالتجارب . انها ، بالمنطق ، مخلوقات حرة للادراك البشري ، انها وسائل التفكير ، وهي تخدم اهدافنا في ربط تجاربنا بعضها ببعض ، بحيث تصبح وسيلة في دراسة هذه التجارب . وان محاولتنا في ان نصبح واعين للمصادر العملية لهذه المفاهيم الاساسية يجب ان تكشف لنا مدى المحدودية الفعلية لهذه المفاهيم . وبذلك نصبح على معرفة بحريتنا ، وهي حرية يصعب دوما ، عند الاقتضاء ، وضعها موضع التنفيذ المحسوس .

ما نزال بحاجة الى اضافة شيء جوهري الى هذا المخطط يتعلق بالاصل النفساني للمفاهيم ، مكان - زمان - حادث (التي نسميها بايجاز « شبه - المكان » لتمييزها عن المفاهيم النابعة من المجال النفساني) . فقد استخرجنا مفهوم المكان من التجارب التي تستخدم الصناديق وترتيب الاغراض المادية فيها . ان هذه الطريقة في تشكيل المفاهيم تفترض سلفا مفهوم الاغراض المادية (« الصندوق » مثلا) .

وبهذه الطريقة ذاتها يلعب الاشخاص ، الذين يجب ادخالهم لتشكيل المفهوم الموضوعي للزمن ، دور الاغراض المادية في هذا الشأن . وبذلك يبدو لي ان تشكيل مفهوم الغرض المادي يجب ان يسبق مفهومينا عن الزمان والمكان .

ان كل مفاهيم شبه - المكان هذه (تنتهي) الى الفكر قبل العلمي مع مفاهيم مثل الحزن والرغبة والامل ... الخ . ذات المنشأ النفساني . ومما يميز الآن الفكر في الفيزياء ، كالفكر في كل العلوم التجريبية عموما ، هو انه يسعى مبدئيا الى التعامل مع مفاهيم شبه - مكان وحيدة ، ويجتهد في ان يعبر بواسطتها عن كل علاقة تتخذ شكل قانون . والفيزيائي يبحث في ارجاع الالوان والاصوات الى اهتزازات ، والقلق الفيزيولوجي والالم الى سيالة عصبية ، وذلك بحيث يختفي العنصر المادي من الآلية السببية للوجود ، ولا يظهر في اي مكان كحلقة مستقلة في التسلسل السببي . ولا شك في ان هذا الموقف ، الذي يقول بان فهم كل العلاقات يتم من خلال استعمال مفاهيم شبه - المكان فقط كمكانية مبدئية ، هو المدلول المفهوم في الوقت الحاضر لكلمة « مادية » (لان « المادة » قد فقدت دورها كمفهوم اساسي) .

ولكن ما ضرورة ان نستمد من المجال الافلاطوني المثل الفكرية الاساسية للعلم التجريبي ، وان نحاول ان نكشف امتدادها الواقعي ؟ الجواب : لكي نحرر هذه المثل من الحظر المفروض عليها ، وبذلك تكون قد قمنا بانجاز تحرير عظيم في تشكيل المثل والمفاهيم . ونحن ندين بذلك للاعمال الخالدة التي قدمها هيوم D. HUME وماخ E. MACH اللذين كانا اول من عالج هذه الافكار الحرجة .

لقد استمد العلم من الافكار قبل العلمية مفاهيم المكان والزمان والجسم المادي (مع الحالة الخاصة الهامة : « الجسم الصلب ») ثم حورها وجعلها اكثر دقة . فكان اول انجاز ناجح له يتمثل في تطوير هندسة اقليدس ، التي يجب ان لا تحجب صياغتها المسلمانية عن اعيننا اصلها العملي (امكانية رصف او تنضيد اجسام صلبة) . ولذكر خصوصا ان السمة الاقليدية والابعاد المكانية الثلاثة ناجمة كلها عن اعتبارات عملية . (يمكن للمكان ان يملأ بمكعبات مصنوعة) .

ان حرجة مفهوم المكان قد تجلت لدى اكتشافي انه لا يوجد اجسام تتمتع بصلابة تامة . فكل الاجسام ذات مرونة معينة كما انها يتغير حجمها بتغير درجة حرارتها . فالتشكيلات البنائية ، التي علينا ان نصف امكانيات تألفها بواسطة الهندسة الاقليدية ، لا يمكن اذن ان تتمثل بمعزل عن المفاهيم الفيزيائية . لكن الفيزياء لا بد لها رغم كل شيء من ان تستخدم الهندسة في توطيد مفاهيمها ، وبهذه الصورة لا يمكن التعبير عن المحتوى العملي للهندسة كما لا يمكن وضعه على محك التجربة ، الا في مجال الفيزياء بتمامها .

وبهذه المناسبة يجب ايضا ان لا ننسى علم الذرة ولا مفهومه في محدودية تجزئة الذرة . لان المسافات في هذا السلم المجهرى لا يمكن قياسها . كما ان علم الذرة يجبرنا على ان نهجر ، مبدئيا ، فكرة وجود سطوح محددة حادة ومكونية للاجسام الصلبة . وبتعبير ادق ، لا يوجد قوانين محكمة ، حتى في المجال المجهرى ، تنظم رصف وتنضيد اجسام صلبة متلامسة فيما بينها .

ورغم هذا ، لم يفكر احد في هجر مفهوم المكان لانه كان يبدو ضروريا
في جميع منظومات العلوم التجريبية المرضية جدا . وقد كان ماخ ، في القرن
التاسع عشر ، الانسان الوحيد الذي فكر جديا باسقاط مفهوم المكان . ولاجل
ذلك حاول ابداله بمفهوم مجمل المسافات الآنية بين كل النقاط المادية . (لقد
قام بهذه المحاولة كي يتوصل الى فهم مرض للعطالة) .

الحقل :

ان المكان والزمان يلعبان في ميكانيك نيوتن دورا مثنويا : فهما ، اولا ،
يلعبان دور حامل او اطار للأشياء التي تحدث في الفيزياء ، فنسند اليهما
الحوادث الموصوفة في الاحداثيات المكانية والزمن ، وتعتبر المادة ، مبدئيا ،
مؤلفة من « نقاط مادية » تولد بحركتها الحدث الفيزيائي . فعندما نتخذ
المادة كائنا مستمرا ، انما نفعل ذلك مؤقتا في الاحوال التي لا نريد فيها ، او
لا نستطيع ، توصيف البنية المتقطعة . فالاجزاء المادية الصغيرة (عناصر الحجم)
تعامل ، في هذه الحال ، معاملة النقطة المادية ، على الاقل عندما لا نهتم الا
بالحركة دون ان نعبأ بما قد يقع لها مما لا يمكن ان يخل بالحركة ولا يفيد في
دراستها (كالتغيرات الحرارية او الكيميائية) . اما الدور الثاني الذي يلعبه
المكان والزمان فقد كان دور « جملة عطالية » . فمن بين كل جمل المقارنة التي
يمكن ان نتصورها كانت الجمل العطالية تتمتع بمزية ان قانون العطالة صحيح
فيها .

والامر الجوهري في هذا هو ان « الحقيقة الفيزيائية » ، عندما نعتبرها
موضوعا مستقلا عن الافتراض الماثلة فيها ، كانت تفهم مؤلفة ، مبدئيا على الاقل ،
من مكان وزمان اولا ومن نقاط مادية موجودة بصورة دائمة ومتحركة في المكان
والزمان ثانيا . هذا وان الوجود المستقل للمكان والزمان يمكن ان تصاغ
بالمقولة الحادة التالية : اذا اختفت المادة فسيبقى المكان والزمان وحدهما
دونها (كنوع من مسرح للوقائع الفيزيائية) .

ان تجاوز هذا الموقف قد تم من خلال تطور بدا ، في اول الامر ، عديم
العلاقة بمسألة المكان - الزمان ، ونعني به ظهور مفهوم **الحقل** وهدفه الصريح

في الحلول ، مبدئيا ، محل فكرة الجسيم (النقطة المادية) . ففي اطار الفيزياء التقليدية كان مفهوم الحقل يبدو مفهوما مساعدا في حالة التعامل مع المادة وكأنها متصل . فلدى التعامل مثلا من الانتقال الحراري في الجسم الصلب كانت حالة الجسم الصلب تتعين بمعرفة درجة الحرارة في كل نقطة من الجسم الصلب وفي كل زمن . وهذا يعني ، رياضيا ، ان درجة الحرارة T تتمثل بصيغة رياضية (بتابع) للاحداثيات المكانية وللزمن t (حقل درجة الحرارة) . ان قانون انتقال الحرارة يتمثل بعلاقة موضعية (بمعادلة تفاضلية) تحوي كل الحالات الخاصة لانتقال الحرارة . ودرجة الحرارة ليست هنا سوى نموذج لمفهوم الحقل . انها مقدار (او مجموعة مقادير) تابع للاحداثيات وللزمن . وكنموذج آخر نسوق عملية توصيف حركة سائل . ففي كل نقطة من حجم السائل يوجد ، في كل زمن ، سرعة تتعين كليا بواسطة ثلاث «مركبات» على محاور جملة احداثيات (بشعاع) . فمركبات السرعة في نقطة (حقل مركبات) هي ، هنا ايضا ، توابع للاحداثيات x, y, z وللزمن t .

ان الحقلين المذكورين يتمتعان بخاصية انهما يتولدان ضمن كتلة وازنة ، فهما يفيدان فقط في توصيف حالة هذه المادة . وطبقا للتطور التاريخي لمفهوم الحقل لا يمكن ان يوجد حقل حيث لا يوجد مادة . بيد انه قد ثبت ، في الربع الاول من القرن التاسع عشر ، ان ظاهرتي التداخل وانتشار الضوء يمكن ان تفسرا بوضوح مدهش عندما نعتبر الضوء حقل - موجة يشبه تماما حقل الاهتزازة الميكانيكية في جسم صلب مرن . وبذلك تولد شعور بضرورة ادخال حقل يمكن ان يوجد في « المكان الخالي » دون وجود مادة وازنة .

لقد نشأ من هذه الشئون وضع غريب لان مفهوم الحقل ، انطلاقا من منشئه ، يتجلى مقتصر على توصيف الحالات ضمن جسم وازن . وهذا يبدو امرا لا يمكن الشك فيه ، خصوصا وان هناك قناعة ان كل حقل يجب ان ينظر اليه كحالة تقبل تفسير ميكانيكيا ، مما يفترض وجود مادة سلفا . والان يشعر المرء بأنه مدعو الى تصور وجود ضرب من المادة ، حتى في ما كان يعتبر خلاء ، اطلق عليها اسم « الاثير » .

ان تخلص مفهوم الحقل من افتراض تعلقه بحامل ميكانيكي قد احتل مكانا بارزا بين القضايا ذات الاهمية النفسانية العظمى في خط تطور الفكر الفيزيائي . ففي النصف الثاني من القرن التاسع عشر ومن خلال اعمال فارادي ومكسويل تبين بوضوح متزايد ان توصيف الوقائع الكهربية بلفة الحقل يفوق عاليا عملية توصيفها بالاعتماد على المفاهيم الميكانيكية للنقاط المادية . فمن جراء ادخال مفهوم الحقل في هذا العلم نجح مكسويل في التنبؤ بوجود امواج كهربية لا يمكن ان يشك بالتطابق الاصيل بينها وبين الامواج الضوئية ، بسبب تساوي سرعتي انتشارها . وكنتيجة لذلك ابتلعت الكهربية مبدئيا علم الضوء . واحد الآثار النفسانية لهذا النجاح العظيم كان ان اكتسب مفهوم الحقل ، في مواجهة النظرة الميكانيكية للفيزياء القديمة ، استقلالاً اكبر .

ومع ذلك فقد اعطي للحقول الكهربية ، في بادىء الامر ، تفسير يعتمد على انها حالات من الاثير ، واعتبرت بحماس حالات ميكانيكية ، لكن الاخفاق المستمر في متابعة هذا الطريق جعل العلم يعتاد تدريجيا على فكرة نبذ مثل هذه الصورة الميكانيكية . على ان القناعة بان الحقول الكهربية يجب ان تمثل حالات من الاثير ظلت قائمة ، وعلى تلك الحال استمر الوضع حتى منعطف القرن .

لقد جلبت نظرية الاثير معها السؤال التالي : كيف يتصرف الاثير ، من وجهة النظر الميكانيكية ، ازاء الاجسام الصلبة ؟ هل يساهم في حركتها ام ان اجزائه تظل في حالة سكون بعضا بالنسبة لبعض ؟ لقد بنيت عدة تجارب رائعة في سبيل الاجابة عن هذا السؤال . وبهذه المناسبة يجب ذكر الوقائع الهامة التالية : « زيغ » النجوم الثابتة نتيجة الحركة السنوية للكرة الارضية ، و « مفعول دوبلر » ، وهو تأثير الحركة النسبية للنجوم الثابتة على تواتر الاهتزازة الضوئية الواردة منها على الارض ، من اجل تواترات اصدار معلومة . لقد فسر لورنتس نتائج هذه الوقائع والتجارب كلها ، ما عدا تجربة مايكلسون - مورلي ، بافتراض ان الاثير لا يشارك في حركات الاجسام الوازنة وان اجزائه

لا تتحرك بعضا بالنسبة لبعض . وبذلك بدأ الاثير ، كما كان ، تجسيدا لمكان ساكن اطلاقا . لكن ابحاث لورنتس قد كشفت شيئا آخر . لقد فسرت كل الوقائع الكهروطيسية والضوئية في الاجسام الوازنة المعروفة في ذلك الوقت ، بافتراض ان تأثير المادة الوازنة على الحقل الكهربائي - وبالعكس - ناجم حصرا عن واقع ان الجسيمات المكونة للمادة تحمل شحنات كهربائية تصاحب الجسيمات في حركتها . اما بخصوص تجربة مايكلسون - مورلي فقد برهن لورنتس على ان نتيجتها لا تتعارض على الاقل ، مع نظرية اثير ساكن .

ويرغم كل هذه النجاحات الجميلة ظلت نظرية الاثير في وضع غير مريح تماما ، وذلك للأسباب التالية . فالميكانيك التقليدي ، الذي يتماسك مع هذه النظرية تماسكا اكيدا ووثيقا ، يقول بتكافؤ كل الجمل العطالية ، او « الامكنة » العطالية ، لدى صياغة قوانين الطبيعة ، اي بعدم تغير شكل هذه القوانين لدى الانتقال من جملة عطالية الى اخرى عطالية . كما ان التجارب الكهروطيسية والضوئية تخضع لهذه المقولة بدقة عظيمة . لكن اساس النظرية الكهروطيسية يقول بوجوب اعطاء افضلية خاصة لجملة عطالية معينة هي ، بالتحديد ، جملة الاثير الضوئي الساكن . ان صورة هذا الاساس النظري كانت اقل بكثير من مرضية . الا يوجد تعديل يحتفظ ، كما في الميكانيك التقليدي ، بتكافؤ الجمل العطالية (نظرية النسبية الخاصة ؟) .

ان الجواب عن هذا التساؤل هو نظرية النسبية الخاصة . انها تستمد من نظرية مكسويل - لورنتس فرضية ثبات سرعة الضوء في الخلاء . ولكي نحقق انسجاما مع تكافؤ الجمل العطالية (مبدأ النسبية الخاصة) يجب ان نهجر الاعتقاد بالتزامن المطلق ، وذلك يستتبع ايضا ظهور تحويل لورنتس ، للزمن والاحداثيات المكانية ، لدى المرور من جملة عطالية لاخرى عطالية . فكل ما تحويه نظرية النسبية الخاصة موجود في المقولة التالية : ان قوانين الطبيعة لا يتغير شكلها ازاء تطبيق تحويل لورنتس عليها . والشيء المهم في هذا المطلب يكمن في واقع انه يحد القوانين الطبيعية الممكنة بشكل معين .

والآن ما هو موقف نظرية النسبية الخاصة من مسألة المكان ؟ يجب قبل

كل شيء ، ان نحذر من الراي القائل بأن فكرة الابعاد الاربعة للواقع الحقيقي هي فكرة جديدة ادخلت للمرة الاولى مع هذه النظرية . ففي الفيزياء التقليدية نفسها كان الحادث يتحدد بأربعة اعداد : ثلاثة احداثيات مكانية واحداثي واحد زمني ، فمجموع « الاحداث » الفيزيائية يعتبر موجودا في متصل رباعي الابعاد . بيد ان الاعتماد على الميكانيك التقليدي يؤدي الى تقطيع هذا المتصل الرباعي ، موضوعيا ، الى متصلين منفصلين : زمان وحيد البعد ومكان ثلاثي الابعاد ، وهذا المكان وحده يحوي الحوادث المتزامنة . وهذا الانفصال قائم في جميع الجمل العطالية . وهذا ما نعينه بالقول ان الزمن مطلق في الميكانيك التقليدي . اما في نظرية النسبية الخاصة فالامر مختلف . ان مجموعة الحوادث المتزامنة مع حادث منتخب موجودة ، حقا في جملة عطالية معينة ، ولكن ليس بصورة مستقلة عن اختيار الجملة العطالية والمتصل الرباعي الابعاد لم يعد قابلا للانقسام الى مقطعين يحويان كلاهما حوادث متزامنة ، وكلمة « الآن » تفقد في امتداد العالم المكاني معناها الموضوعي . ذلك هو السبب الذي من اجله يجب اعتبار الزمان والمكان متصلا واحدا ذا اربعة ابعاد غير قابل للانقسام موضوعيا اذا اردنا ان نعبر عن محتوى العلاقات الموضوعية دون اللجوء الى عملية اصطلاح اعتباطية غير ضرورية .

بما ان نظرية النسبية الخاصة قد كشفت عن التكافؤ فيما بين جميع الجمل العطالية . فهي بذلك تثبت عدم امكانية التمسك بفرضية الاثير الساكن . وعندها يصبح من الضروري ان نتخلى عن فكرة ان الحقل الكهرطيسي حالة من حالات حامل مادي . وهو بذلك يصبح عنصرا من عناصر التوصيف الفيزيائي قائما بذاته كما يقوم مفهوم المادة بذاته في نظرية نيوتن .

لقد ركزنا اهتمامنا حتى الآن على كيفية التعديل الذي ادخلته نظرية النسبية الخاصة على مفهومي المكان والزمان . لنركز الآن انتباهنا على الامور التي استمدتها نظرية النسبية من الميكانيك القديم . ففيها ايضا تبقى قوانين الطبيعة صالحة فقط عندما تتخذ الجملة العطالية اساسا في توصيف المكان - الزمان . فمبدأ العطالة ومبدأ ثبات سرعة النور صحيحان في الجمل العطالية فقط .

كما ان قوانين الحقل لا يمكن ان يكون لها معنى ولا صحة الا في الجمل العطالية . فالمكان ، هنا ايضا وكما في الميكانيك التقليدي ، عنصر مستقل في تمثيل الحقيقة الفيزيائية . فلو تخيلنا ان المادة والحقل قد اختفيا ، فان المكان العطالي او ، بتدقيق اكبر ، هذا المكان مع الزمان المرتبط به يبقيان بعدهما . هذا وان البناء الرباعي الابعاد (فضاء منكوفسكي) هو الذي يعتبر الحامل للمادة والحقل . فالامكنة المرتبطة بها ، هي وحدها الجمل الاحداثية الرباعية الابعاد المتميزة بان المرور من احداها لاخرى يتم بتحويلات لورنتس الخطية . ولما كان لم يعد يوجد في هذا البناء الرباعي الابعاد اي مقتطع يمثل « الآن » موضوعيا ، فان مفاهيم الحدود والضرورة اصبحت معطلة تماما وبقيت على تعقيدها . وبذلك يبدو طبيعيا اكثر ان نفكر بالحقيقة الفيزيائية على اساس انها ذات وجود رباعي الابعاد وليست ، كما كانت ، تطورا في وجود ثلاثي الابعاد .

ان هذا المكان الرباعي الابعاد المتناسك ، في نظرية النسبية ، يشابه في بعض وجوهه اثر لورنتس الثلاثي الابعاد المتصلب . ففي نظرية لورنتس تبقى المقولة التالية صحيحة : ان توصيف الحالات الفيزيائية يفترض مكانا موجودا سلفا وذا وجود مستقل . وهكذا نرى انه ، حتى هذه النظرية لم تتحرر من العيوب الديكارتية المتمثلة بوجود مستقل ، او قبلي ، لـ « المكان الخالي » . وهدفنا الحقيقي من هذه المناقشة الاولى التي نوردتها هنا ، هو ان نكشف الى اي مدى امكن تجاوز هذه الشكوك في نظرية النسبية العامة .

مفهوم المكان في نظرية النسبية العامة :

لقد نشأت هذه النظرية ، في البدء ، من محاولة فهم سبب التساوي بين الكتلة العطالية والكتلة الثقالية . ننتقل من جملة عطالية $S1$ فضاؤها ، من وجهة النظر الفيزيائية ، خال . او ، بتعبير آخر ، لا يوجد في الحيز المكاني الذي هي فيه مادة (بالمعنى المعتاد) ولا حقل (بالمعنى المعروف في نظرية النسبية الخاصة) . لنفترض الآن انه يوجد جملة مقارنة ثانية $S2$ ذات تسارع منتظم بالنسبة لـ $S1$. $S2$ ليست اذن جملة عطالية . وكل كتلة اختبار في $S2$ تكون ذات حركة متسارعة لا تتعلق بحالتها الفيزيائية او الكيميائية .

فبالنسبة لـ S_2 يوجد اذن حالة لا يمكن تمييزها ، لاول وهلة على الاقل ، عن وجود حقل ثقلي . فالمفهوم التالي ينسجم اذن مع الوقائع الملحوظة : ان S_2 يكافئ ايضا « جملة عطالية » ، ولكن يوجد بالنسبة لـ S_2 حقل (متجانس) ثقلي (لا يهتم المرء بأصله) . وهكذا ، عندما يسود حقل ثقلي في جملة المقارنة المدروسة فان الجملة العطالية تفقد معناها الموضوعي ، على اعتبار ان « مبدأ التكافؤ » هذا يمكن ان يتعمم على اية حركة مهما كانت جمل المقارنة . فاذا امكن ان نبني نظرية متماسكة على هذه الافكار الاساسية فان هذه النظرية ستتجيب من تلقاء ذاتها لواقع تساوي الكتلتين ، العطالية والثقالية ، المؤكدة عمليا .

ان التحويل اللاخطي للاحداثيات الاربعة ، عندما يعالج في متصل رباعي ، يعبر عن المرور من S_1 الى S_2 . وهنا يبرز سؤال : ما هو شكل التحويلات اللاخطية المسموح بها ، او ، كيف يمكن تعميم تحويل لورنتس ؟ وللجواب عن هذا السؤال نسوق الاعتبارات الحاسمة التالية .

يمكن ان نعزو للجملة العطالية في النظرية الاسبق الخاصة التالية : ان الفروق في الاحداثيات تقاس بـ « قضبان » قياس مستقرة ، والفروق الزمنية بميقاتيات ساكنة . ان الافتراض الاول مدعوم بافتراض آخر هو ان النظريات حول « الاطوال » في الهندسة الاقليدية تنطبق على قضبان القياس الساكنة المرصوفة بالتوالي . وبمحاكمات بسيطة نستنتج من نظرية النسبية الخاصة ان هذا المدلول الفيزيائي للاحداثيات مفقود في جمل مقارنة (S_2) متسارعة بالنسبة لجملة عطالية (S_1) . فاذا كان الحال كذلك فان الاحداثيات تعبر عندئذ حصرا عن مدى او عن رتبة « التماس » وبالتالي ايضا عن الدرجة البعدية للمكان ، لكنها لا تعبر عن اي من خواصه المترية . وبدلك نصبح مضطرين الى تعميم التحويلات على شكل تحويلات مستمرة اختيارية (١) . وهذا يتضمن مبدأ النسبية العامة : ان قوانين الطبيعة يجب ان تتوافق في التحويلات المستمرة الاختيارية للاحداثيات . وهذا الوجوب (بالاضافة الى

(١) - ان هذا الاسلوب في التعبير ليس صحيحا بالضبط ولكنه ربما يكفي هنا .

وجوب كون القوانين ذات بساطة ومنطقية عظميين) يضع للقوانين الطبيعية المستهدفة حدودا اضيق بكثير من الحدود التي يفرضها مبدأ النسبية الخاصة .

ان تسلسل الافكار يستند جوهريا على الحقل كمفهوم مستقل . لان الظروف السائدة في S_0 تفسر كحقل ثقالي دون ان نثير مسألة وجود الكتل التي تولد الحقل . وبفضل تسلسل الافكار هذا نستطيع ان نفهم لماذا كانت قوانين الحقل الثقالي المحض مرتبطة بنظرية النسبية العامة اكثر من ارتباط الحقول الاخرى بها (كان يكون ثمة حقل كهربيسي مثلاً) . وهذا يعني تماما اننا نملك اساسا جيدا لافتراض ان فضاء منكوفسكي « العديم الحقل » يمثل حالة خاصة ممكنة من القانون الطبيعي ، هي ، في الواقع اكثر الحالات الخاصة التي يمكن ان نتصورها ببساطة . ان الخواص المترية لمثل هذا المكان تتميز بواقع ان المجموع $dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$ هو مربع الفاصل المكاني ، مقاسا بوحدة عيارية ، بين نقطتين لا متناهيتين في التجاور من مقتطع « شبه مكان » ثلاثي الابعاد (علاقة فيثاغورس) ، بينما dx_4^2 هو الفاصل الزمني ، مقاسا بمعيار زمني مناسب ، بين حادثين يشتركان في (x_1, x_2, x_3) . وهذا يعني ببساطة ان معنى موضوعيا متريا معلق بالمقدار :

$$(١) \quad ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2$$

كما ثبت لنا ، منذ قليل ، من خلال تحويلات لورنتس . وهذا الواقع يتعلق رياضيا بشرط كون ds^2 لا متغيرا ازاء تحويلات لورنتس .

والآن ، اذا اخضعنا هذا المكان (المعادلة (١)) ، في عرف مبدأ النسبية العام ، الى تحويل احداثي مستمر اختياري ، نعبر عندئذ عن المعنى الموضوعي لـ ds في جملة احداثيات جديدة بالعلاقة :

$$(١ ب) \quad ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k$$

حيث تجري عملية جمع على القرينتين K, i من اجل كل التراكييب 11 , 12 حتى 44 . فالامثال g_{ik} ليست الآن ثابتة ولكنها: توابع للاحداثيات تتعين بالتحويل المنتخب اختياريا . على ان هذه الامثال g_{ik} ليست توابع اختيارية للاحداثيات الجديدة ولكنها فقط توابع من نوع يتميز بأن الصيغة (١ ب) يمكن ان تتحول عائدة الى الصيغة (١) بواسطة تحويل مستمر للاحداثيات الاربعة . ولكي يكون هذا ممكنا يجب على g_{ik} ان تحقق مجموعة معادلات شرطية في توافق التحويل ، كان ريمان قد حصل عليها قبل نصف قرن من صياغة نظرية النسبية العامة (شرط ريمان) . وطبقا لمبدأ التكافؤ فان (١ ب) تعبر ، بشكل موافق التغير ، عن حقل ثقالي من نوع خاص ، وذلك عندما تستجيب التوابع g_{ik} لشرط ريمان .

ينتج من ذلك ان القانون المطلوب من اجل الحقل الثقالي المحض من النوع العام يجب ان يتحقق عندما يتحقق شرط ريمان ، لكنه يجب ان يكون اضعف او اضيق مدى من شرط ريمان . وبهذه الطريقة يتعين عمليا قانون الحقل في الثقائل المحض ، وهي نتيجة لن نبررها بتفصيل اوسع هنا .

نحن الآن في وضع يمكننا ان نستشف منه الى اي مدى صورت نظرية النسبية العامة في مفهوم المكان . فللمكان (المكان - الزمان) ، بموجب الميكانيك التقليدي ونظرية النسبية العامة ، وجود مستقل عن المادة وعن الحقل . فلكي نستطيع ان نصف بالتمام كل ما يملأ المكان مما هو مستقل عن الاحداثيات ، فان المكان - الزمان ، او الجملة العطالية بخواصها المترية ، يجب ان يعتبر دفعة واحدة شيئا موجودا ، والا فقد توصيف « ما يملأ المكان » معناه (١) . والمكان ، في نظرية النسبية العامة من جهة اخرى وكشيء يحل محل « ما يملأ المكان » ، ليس له وجود منفصل . وبذلك يمكن للحقل الثقالي المحض ان يتعين بخواص g_{ik} (كتوابع للاحداثيات) ، اي بحل معادلات الثقائل . فباذا تصورنا ان الحقل الثقالي ، اي التوابع g_{ik} ، قد زال ، فلن يبقى مكان

(١) - اذا اعتبرنا ان ما يملأ المكان (الحقل مثلا) قد زال ، فسيبقى المكان المتري وفق العلاقة (١) التي يجب ان تحدد ايضا السلوك البدئي لجسم الاختبار المستخدم هنا .

من النوع (١) ، بل لن يبقى شيء على الإطلاق ، حتى ولا « فضاء توبولوجي » (١) .
 لأن التوابع g_{ik} لا تصف الحقل فحسب بل وتصف أيضا في الوقت نفسه
 الخواص التوبولوجية والبنية المترية لمتعدد الأبعاد . فالفضاء الذي من
 النوع (١) ، ليس ، من وجهة نظر النسبية العامة ، فضاء دون حقل ، بل
 هو حالة خاصة من الحقل g_{ik} ، حالة لا يكون فيها - في جملة المقارنة
 المستخدمة التي ليس لها بحد ذاتها معنى موضوعي - للتوابع g_{ik} قيم
 مستقلة عن الاحداثيات . ولا يوجد من هذا القبيل شيء ويمكن ان يعتبر
 مكانا خاليا ، اي مكانا بدون حقل .

فالمكان - الزمان ليس موجودا بنفسه ، بل كخاصة بنيوية للحقل .

وعلى أساس هذا كله ، لم يكن ديكارت بعيدا جدا عن الحقيقة عندما
 اعتقد بوجوب استبعاد وجود مكان خال . فالفكرة فعلا تبدو محالا ، طالما
 كانت الحقيقة الفيزيائية لا ترى الا من خلال الاجسام الوازنة . فهي تتطلب
 فكرة الحقل كممثل للحقيقة ، بالاشتراك مع مبدأ النسبية العامة ، كي تظهر
 البدرة الحقيقية لفكرة ديكارت ، يوجد مكان « خال من الحقل » .

تعميم نظرية التثاقل :

ان نظرية الحقل التثاقلي الصرف ، على اساس من نظرية النسبية
 العامة ، قد اطلت الآن برأسها ، لاننا نستطيع ان نشق بأن « الحقل الحر »
 لفضاء منكوفسكي ، بخواصه المترية المنسجمة مع (١) ، يجب ان يستجيب
 لقوانين الحقل العامة . فقانون الحقل يستمد من هذه الحالة الخاصة بتعميم
 نظيف من أي اعتبار . وان التطوير اللاحق لهذه النظرية ، بواسطة نظرية
 النسبية العامة ، لم يحدث في اتجاه واحد ، فقد جرى ، في العقود الزمنية
 الأخيرة ، تجريب اتجاهات متنوعة . والهدف المشترك لهذه المحاولات كلها هو
 ادراك الحقيقة الفيزيائية كحقل هو ، فوق ذلك ، تعميم للحقل التثاقلي ، اي

(١) - ان التوبولوجيا علم يهتم بالحاكمات الرياضية بمعزل عن أي مدلول محسوس .

(المترجم) .

بحيث يكون قانون الحقل تعميما للقانون الذي يصف الحقل التثاقلي الصرف . وبعد عملية سبر طويلة اعتقد انني وجدت الآن اكثر اشكال هذا التعميم معقولة (١) ، لكنني لست قادرا بعد على اكتشاف فيما اذا كان هذا القانون العام يمكن ان يصمد امام وقائع التجربة .

ان مسألة قانون الحقل الخاص مسألة ثانوية في الاعتبار العامة السابقة، والمسألة الرئيسية اليوم هي : هل نظرية الحقل التي من النوع المشروح هنا يمكن ان توصلنا الى الهدف ؟ ونعني بذلك نظرية تقتصر على توصيف الحقيقة الفيزيائية ، بما فيها المكان الرباعي الابعاد ، بواسطة حقل . ان جيل الفيزيائيين الحالي يميل الى الجواب عن هذا السؤال بالنفي . فهم ، بموجب الشكل الحالي لنظرية الكم ، يعتقدون ان حالة الجملة المدروسة لا يمكن ان تتعين مباشرة ، بل بشكل غير مباشر فقط وبإدخال مقولات احصائية بخصوص نتائج القياس الذي نجربه على الجملة المدروسة . ويسود الاعتقاد بأن المثوية المؤكدة في الطبيعة (الجسيمية والموجبة) لا يمكن ان تتحقق الا باضعاف مفهوم الحقيقة . ولكنني اعتقد ان الوصول الى هذا المدى من التخلي النظري ليس له اليوم ما يسوغه في معارفنا الفعلية ، وان على المرء ان لا يتراجع عن السير في طريق نظرية الحقل النسبوية حتى نهايته .



(١) - ان هذا التعميم يتميز بالطريقة التالية : ان الحقل التثاقلي للتوابع g_{ik} ، كما يشتق من « فضاء منكوفسكي » الخالي ، يتمتع بخاصة التناظر $g_{ik} (g_{21}=g_{12})$ ، الخ . اما الحقل المعمم فهو من النوع نفسه ولكن بدون خاصية التناظر . اما استخراج قانون الحقل فيتم بصورة مشابهة تماما لحالة التثاقل الصرف الخاصة .

الفهرس

الصفحة

الموضوع

تقديم ٣

مقدمة ٥

القسم الاول

نظرية النسبية الخاصة ٧

١ - المعنى الفيزيائي للمقولات الهندسية ٩

٢ - جملة الاحداثيات ١٣

٣ - المكان والزمان في الميكانيك التقليدي ١٦

٤ - جملة الاحداثيات الفاليلية ١٨

٥ - مبدأ النسبية (بالمعنى المقصور) ١٩

٦ - جمع السرعات المستعمل في الميكانيك التقليدي ٢٢

٧ - التعارض الظاهر بين قانون انتشار الضوء ومبدأ النسبية ٢٣

٨ - حول فكرة الزمن في الفيزياء ٢٧

٩ - نسبية التزامن ٣١

١٠ - نسبية مفهوم المسافة ٣٥

- ١١- تحويل لورنتز ٣٧
- ١٢- سلوك قضبان القياس والميقاتيات المتحركة ٤٣
- ١٣- جمع السرعات النسبوي (تجربة فيزو) ٤٧
- ١٤- القيمة النفعية لنظرية النسبية ٥١
- ١٥- النتائج العامة للنظرية ٥٣
- ١٦- التجربة ونظرية النسبية الخاصة ٥٧
- ١٧- فضاء منكوفسكي ذو الأبعاد الأربعة ٦١

القسم الثاني

- نظرية النسبية العامة ٦٥
- ١٨- مبدأ النسبية الخاص والعام ٦٧
- ١٩- حقل الثقائل ٧١
- ٢٠- التساوي بين الكتلة العطالية والكتلة الثقالية كدليل على مشلطة النسبية العامة ٧٥
- ٢١- ما هو السبب الذي يجعل أسس الميكانيك التقليدي ونظرية النسبية الخاصة غير مرضية ٧٩
- ٢٢- بعض الاستنتاجات من مبدأ النسبية العامة ٨١
- ٢٣- سلوك الميقاتيات وقضبان القياس المربوطة بجسم مقارنة دوار ... ٨٥
- ٢٤- المتصل التقليدي والمتصل اللاقليدي ٨٩

الموضوع	الصفحة
٢٥- الاحداثيات الفوقية	٩٣
٢٦- المتصل المكاني - الزماني في نظرية النسبية الخاصة على اعتبار انه متصل اقليدي	٩٧
٢٧- المتصل المكاني - الزماني لنظرية النسبية العامة ليس متصلا اقليديا	٩٩
٢٨- الصياغة السديدة لمبدأ النسبية العام	١٠٢
٢٩- حل مسألة التماثل بالاستناد على مبدأ النسبية العام	١٠٥

القسم الثالث

١٠٩- تأملات في العالم الكوني بمجمله	١٠٩
٣٠- مصاعب نظرية نيوتن في معرفة العالم الكوني	١١١
٣١- امكانية عالم (منته) و (لا محدود) مغا	١١٣
٣٢- بنية المكان بموجب نظرية النسبية العامة	١١٧

الملحق (١)

١١٩- طريقة بسيطة لاستنباط تحويل لورنتس	١١٩
--	-----

الملحق (٢)

١٢٥- فضاء منكوفسكي ذو الابعاد الاربعة	١٢٥
---	-----

الملحق (٣)

١٢٧- الاثبات التجريبي لنظرية النسبية العامة	١٢٧
---	-----

الملحق (٤)

بنية الفضاء بموجب نظرية النسبية العامة ١٣٧

الملحق (٥)

النسبية ومسألة المكان ١٣٩



